

弾性流体潤滑下におけるコーティング膜の設計指針

著者	藤野 俊和
学位名	博士（工学）
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2008
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00000775/

博士学位論文

弾性流体潤滑下における
コーティング膜の設計指針

平成 20 年度
(2009 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
応用環境システム学専攻

藤 野 俊 和

目次

第 1 章 緒論	1
1. 1 はじめに	1
1. 2 表面改質	2
1. 3 従来の研究	3
1. 3. 1 D. F. Diao らの研究	3
1. 3. 2 A. A. Elsharkawy らの研究	3
1. 3. 3 黒田成昭らの研究	7
1. 3. 4 岩本勝美らの研究	7
1. 4 本研究の目的と研究方針	7
1. 5 本論文の構成	10
参考文献	11
第 2 章 コーティング膜の内部応力と油膜厚さの解析方法	12
2. 1 はじめに	12
2. 2 ヘルツの接触理論	12
2. 3 解析モデル	12
2. 4 解析方法	13
2. 5 油膜解析	15
2. 5. 1 構成方程式の無次元化	15
2. 5. 2 数値解析の手法	16
2. 6 球およびコーティング膜の弾性変形量解析	23
2. 7 コーティング膜および下地金属の応力解析	25
2. 8 最大ヘルツ圧力とヘルツ接触半幅の解析	28
2. 9 解析のフローチャート	30
2. 10 解析方法の検証	30
参考文献	34
第 3 章 一層のコーティング膜の応力分布と油膜厚さ	35
3. 1 解析条件	35
3. 2 ヘルツ接触圧力およびヘルツ接触半幅	35
3. 3 油膜圧力および油膜厚さ	38
3. 3. 1 コーティング膜と下地金属のヤング率比の影響	38
3. 3. 2 コーティング膜の厚さの影響	43
3. 4 内部応力	47
3. 4. 1 コーティング膜と下地金属のヤング率比の影響	48

3. 4. 2 コーティング膜の厚さの影響	48
3. 5 小結	58
参考文献	59
付表	60

第4章 中間層を有するコーティング膜の応力分布と油膜厚さ・75

4. 1 解析条件	75
4. 2 油膜圧力および油膜厚さ	77
4. 2. 1 軟質コーティング膜の場合 ($E_c/E_s=0.5$ の場合)	77
4. 2. 2 硬質コーティング膜の場合 ($E_c/E_s=2.0$ の場合)	82
4. 3 内部応力	89
4. 3. 1 軟質コーティング膜の場合 ($E_c/E_s=0.5$ の場合)	89
4. 3. 2 硬質コーティング膜の場合 ($E_c/E_s=2.0$ の場合)	101
4. 4 小結	109
参考文献	111
付表	112

第5章 傾斜層を有するコーティング膜の応力分布と油膜厚さ・120

5. 1 解析条件	120
5. 2 油膜圧力および油膜厚さ	122
5. 2. 1 軟質コーティング膜における傾斜層の影響 ($E_c/E_s=0.5$ 場合)	122
5. 2. 2 硬質コーティング膜における傾斜層の影響 ($E_c/E_s=2.0$ 場合)	122
5. 3 内部応力	124
5. 3. 1 軟質コーティング膜における傾斜層の影響 ($E_c/E_s=0.5$ 場合)	124
5. 3. 2 硬質コーティング膜における傾斜層の影響 ($E_c/E_s=2.0$ 場合)	130
5. 4 小結	136
付表	137

第6章 コーティング膜の設計指針・138

6. 1 一層のコーティング膜の設計指針	138
6. 2 中間層および傾斜層を有するコーティング膜の設計指針	139

第7章 結論	140
謝辞	143
付録1 (2.36) 式および(2.37) 式の導出	144
付録2 コーティング膜材のヤング率測定	147
2. 1 はじめに	147
2. 2 実験装置	147
2. 2. 1 実験装置の概要	147
2. 2. 2 実験装置に使用した機器	147
2. 3 試験片	149
2. 3. 1 溶射材料	149
2. 3. 2 形状	149
2. 4 実験方法	151
2. 4. 1 下地金属およびコーティング膜のひずみ量測定手順	151
2. 4. 2 下地金属およびコーティング膜のヤング率解析	151
2. 5 実験結果	155
2. 6 小結	156
参考文献	158

Nomenclature

【第2章】

b	試験片幅 [m]
e	はりの厚さの中央を通る水平軸と中性面との距離[m]
h_c	コーティング膜の厚さ [m]
h_s	下地金属の厚さ [m]
E_c	コーティング膜のヤング率 [Pa]
E_s	下地金属のヤング率 [Pa]
L	負荷をかける位置からひずみゲージ中心までの距離 [m]
M	曲げモーメント [m・N]
W	負荷荷重 [N]
Z	断面係数
ε_c	コーティング膜のひずみ量
ε_s	下地金属のひずみ量

【第3章～第7章】

a	ヘルツ接触半幅 [m]
D^b	球の影響係数
D^c	コーティング膜表面の影響係数
E_b	球のヤング率 [Pa]
E_c	コーティング膜のヤング率 [Pa]
E_m	中間層のヤング率 [Pa]
E_g	傾斜層のヤング率 [Pa]
E_s	下地金属のヤング率 [Pa]
E'	等価ヤング率 [Pa]
F	負荷荷重 [N]
G	無次元材料パラメータ, $G = \alpha E'$
h	油膜厚さ [m]
h_{\min}	最小油膜厚さ [m]
h_0	接触中心における油膜厚さ [m]
H	無次元油膜厚さ, $H = hR_x / a^2$
H_{\min}	無次元最小油膜厚さ, $H_{\min} = h_{\min}R_x / a^2$
H_0	接触中心における無次元油膜厚さ, $H_0 = h_0R_x / a^2$
n_x	x 方向の節点数
n_y	y 方向の節点数
p	油膜圧力 [Pa]
p_h	最大ヘルツ接触圧力 [Pa]
p_{\max}	最大油膜圧力 [Pa]

P	: 無次元油膜圧力, $P = p / p_h$
P_{\max}	: 無次元最大油膜圧力, $P_{\max} = p_{\max} / p_h$
R_x	: 球の曲率半径 [m]
T_c	: コーティング膜厚さ [m]
T_m	: 中間層厚さ [m]
u	: 四面体要素の各節点における x 方向変位 [m]
u^b	: 球の回転速度 [m/s]
u^c	: コーティング膜の回転速度 [m/s]
u^m	: 引き込み速度, $u^m = (u^b + u^c) / 2$ [m/s]
U	: 無次元速度パラメータ, $U = u^m \eta_0 / R_x E'$
v	: 四面体要素の各節点における y 方向変位 [m]
v^b	: 球の弾性変形量 [m]
v^c	: コーティング膜の弾性変形量 [m]
V^b	: 球の無次元弾性変形量, $V^b = v^b R_x / a^2$
V^c	: コーティング膜の無次元弾性変形量, $V^c = v^c R_x / a^2$
w	: 四面体要素の各節点における z 方向変位 [m]
W	: 無次元荷重パラメータ, $W = F / E' R_x^2$
x, y, z	: 座標 [m]
X, Y, Z	: 無次元座標, $X = x / a, Y = y / a, Z = z / a$
Z_c	: コーティング膜と下地金属の界面の Z 座標 (第 4 章), $Z_c = T_c / a$
Z_c	: コーティング膜と中間層の界面の Z 座標 (第 5 章), $Z_c = T_c / a$
Z_m	: 中間層と下地金属の界面の Z 座標 (第 5 章), $Z_m = (T_c + T_m) / a$
α	: 潤滑油の粘度-圧力係数
γ	: Roeland パラメータ
η	: 潤滑油の粘度 [Pa·s]
η_0	: 潤滑油の大気圧粘度 [Pa·s]
η^*	: 潤滑油の無次元粘度, $\eta^* = \eta / \eta_0$
κ_b	: 球のポアソン比
κ_c	: コーティング膜のポアソン比
κ_m	: 中間層のポアソン比
κ_g	: 傾斜層のポアソン比
κ_s	: 下地金属のポアソン比
ρ	: 潤滑油の密度 [kg/m ³]
ρ_0	: 潤滑油の大気圧密度 [kg/m ³]
ρ^*	: 潤滑油の無次元密度, $\rho^* = \rho / \rho_0$
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: 垂直応力成分 [Pa]
$\sigma_{x-\max}, \sigma_{y-\max}, \sigma_{z-\max}$: 垂直応力成分の最大値 [Pa]
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: せん断応力成分 [Pa]
$\tau_{xy-\max}, \tau_{yz-\max}, \tau_{zx-\max}$: せん断応力成分の最大値 [Pa]
τ_{\max}	: X-Z 平面における最大せん断応力 [Pa]

$\tau_{\text{max-max}}$: X - Z 平面における最大せん断応力の最大値 [Pa]
σ_{mises}	: von Mises 応力 [Pa]
$\sigma_{\text{mises-max}}$: von Mises 応力の最大値 [Pa]

第1章 緒 論

1. 1 はじめに

機械装置には、歯車や転がり軸受などしゅう動部を有する機械要素が多数使用されている。歯車の噛み合わせ部や転がり軸受の転動体と内外輪との間の潤滑部では、微小領域に高荷重が負荷されるために、固体面に挟まれた潤滑油に GPa オーダーの非常に高い圧力が発生する。そのため固体面は弾性変形をし、内部に高応力が生じる。このような厳しい潤滑状態を弾性流体潤滑（Elasto-Hydrodynamic Lubrication：EHL）という^[1.1]。

機械要素のしゅう動面では、常に摩擦の最適化と摩耗の低減が図られている。制動部品のしゅう動面では摩擦を高めることがなされるが、それ以外では一般的に摩擦はできる限り小さく抑え、摩耗については、相接する両面ともにできる限り少なくしたいのが通常である^[1.2]。

しゅう動面において、接触しかつ相対運動をする固体二面間の摩擦を減らし、摩耗による損失を防止する最良の方法は流体潤滑である^[1.3]。流体潤滑下では、固体表面間に満たされた流体膜に発生する圧力分布によって負荷が支持され、流体膜厚さが二面の表面粗さ以上となり固体間の真実接触は存在せず、摩擦は極度に低下する。従って、摩耗も生じにくい状態が実現できることから、機械要素のしゅう動部では流体潤滑が広く利用されている。

しかしながら、しゅう動面が弾性流体潤滑下で転がり滑りをしている機械要素では、微小領域に高荷重が負荷され、材料内部に高応力が生じることから、理想的な流体潤滑下で使用された場合においても機械要素の運転条件によっては厳しい損傷を生じる可能性がある。機械装置に使用されている機械要素に損傷が生じ運転不能になった場合、機械装置は性能を十分に発揮できず、場合によっては機能し難くなる。このように機械要素の信頼性が機械装置の信頼性を担っているといっても過言ではない。

機械要素の損傷軽減や寿命向上のために、しゅう動材料の改良が改善策として挙げられる。近年の工業技術の発展に伴って、材料は多様化し材料の高性能化への要求が高まっているが、高性能材料は一般に高価であり、機械要素全体を高価な高性能材料で製造することはできない。

そこで近年、機械要素の損傷軽減や寿命向上のために、しゅう動面をトライボロジー特性の優れた材料で被覆し、その改質を図る表面改質が一つの手段として使われており、この技術は、弾性流体潤滑のような極めて厳しい潤滑条件下においても有効であると考えられる。

従来、しゅう動面で使用される皮膜の設計には経験に基づいて選定された材料を実験により強度評価し、使用条件・運転条件下で耐え、要求仕様を満足するかどうかの確認が行われている。しかしながらこのような手段では、コーティング膜の選

定は試行錯誤的であり、従って最適な設計がなされているとは言い難い。

表面改質技術の実用化には、コーティング膜の機械的特性を把握し、得られた機械的特性を用いて、コーティング膜の設計指針を得る必要がある。しかしながら、これまでの研究において、コーティング膜の機械的特性は正確に評価されておらず、明確な設計指針は得られていない。

そこで、しゅう動面が弾性流体潤滑下で転がり滑りをしている機械要素の損傷軽減や寿命向上を目的として、使用条件・運転条件に対して最適なコーティング膜の設計を行うためには、コーティング膜の機械的特性ならびに内部で生じる応力を正確に評価し、その結果をもとにコーティング膜の明確な設計指針を得ることが重要であると考えられる。

1. 2 表面改質

表面改質技術とは、固体（以下、下地金属とよぶ）の表面を別の材料で被覆する（コーティング）あるいは表面に強力なエネルギーを付加することにより、素材表面に耐摩耗性・耐食性・耐疲労性・耐熱性・しゅう動性等の新たな特性を付与する技術である^[1.4]。様々な表面機能向上を目的とした表面改質技術は、機械工業分野に留まらず、電子、航空宇宙工学分野など諸分野で注目され、数多くの成膜方法が提案され実用化されている。

表面改質の成膜方法には、物理的方法、化学的方法および冶金的方法など多数あるが、得られる膜の組成と構造により以下の3つに大別される^[1.5]。

- （1）主に下地金属に機械エネルギーや熱エネルギーを与えることで、材料の構造を変化させ、その結果材料の機械的特性を変化させる方法（ショットピーニング、熱処理など）
- （2）下地金属に別の元素を添加する方法（拡散処理、イオン注入など）
- （3）下地金属に別の材料をコーティングする方法（塗装、メッキ、溶射、CVDやPVDのコーティング膜など）

また、表面改質を行う深さにより、以下の2つに大別される^[1.5]。

- （1）表面に修飾あるいは極表面近傍だけ改質する方法
- （2）数 μm 程度の深さまで改質する方法

表面改質後の皮膜としては、下地金属と比べて低い硬度を有する軟質皮膜と下地金属と比べて高い硬度を有する硬質皮膜があり^[1.3]、皮膜形成速度、皮膜費用、生成される膜の使用用途などに応じた成膜方法が適宜選択され使用されている。

1. 3 従来の研究

本節では、弾性流体潤滑下で使用されるコーティング膜だけでなく、無潤滑下で使用されるコーティング膜まで拡張し内部応力を解析し考察を行った従来の研究について述べる。

1. 3. 1 D.F.Diao らの研究^{[1.6]~[1.8]}

D.F.Diao らは、下地金属上に施された硬質コーティング膜に円筒が押し付けられ、さらに摩擦力が負荷されるモデルについて、コーティング膜、下地金属およびコーティング膜と下地金属との界面付近で生じる応力を有限要素法を用いて解析し、考察を行った^{[1.6], [1.7]}。その結果、摩擦係数が大きい場合には摩擦面上で最大応力が生じるに対して、摩擦係数が小さくなると、界面近傍で最大応力が生じることがわかった(図 1.1)^[1.6]。さらに膜厚 t とヘルツ接触半幅 a との比 t/a が大きくなると、コーティング膜内もしくは界面近傍で最大応力を生じることがわかった(図 1.2)^[1.7]。さらに、D.F.Diao らは、下地金属と硬質コーティング膜との間に双方とは性質が異なる層(中間層)が施された場合についても同様の解析を行い、考察を行った^[1.8]。

上記の研究では、すべて線接触で無潤滑条件下で使用されるコーティング膜を対象としており、弾性流体潤滑下で使用されるコーティング膜を対象としていない。

1. 3. 2 A.A.Elsharkawy らの研究^[1.9]

A.A.Elsharkawy らは、図 1.3 に示す高硬度および低硬度の2種類のコーティング膜が施された2つの円筒が弾性流体潤滑下で相対すべりをする場合を考え、その固体面間にある潤滑油膜内に生じる油膜圧力および油膜厚さを解析し考察を行った。高硬度のコーティング膜は窒化チタンを、低硬度のコーティング膜は二硫化モリブデンをそれぞれ想定し、解析にはコーティング膜材のバルクのヤング率およびポアソン比をそれぞれ用いている。

その結果、低硬度コーティング膜を用いた場合には、コーティング膜の厚さが増加するに伴い、ヘルツ接触領域がより広くなり、最大油膜圧力値がより小さくなるのに対して、高硬度コーティング膜を用いた場合には、ヘルツ接触領域がより狭くなり、最大油膜圧力値がより大きくなることがわかった。またコーティング膜硬度の高低によらず、潤滑油が等粘度状態にあると仮定した場合の潤滑油膜の厚さは、潤滑油の粘性が油膜圧力により変化すると仮定した場合の潤滑油膜の厚さより薄くなることがわかった。さらにコーティング膜厚さは、高硬度、低硬度の両コーティング膜において、最小油膜厚さと最大油膜圧力に大きな影響をおよぼすことがわかった。

この研究では、線接触条件下で解析が行われており、コーティング膜および下地金属に生じる内部応力については解析が行われていない。

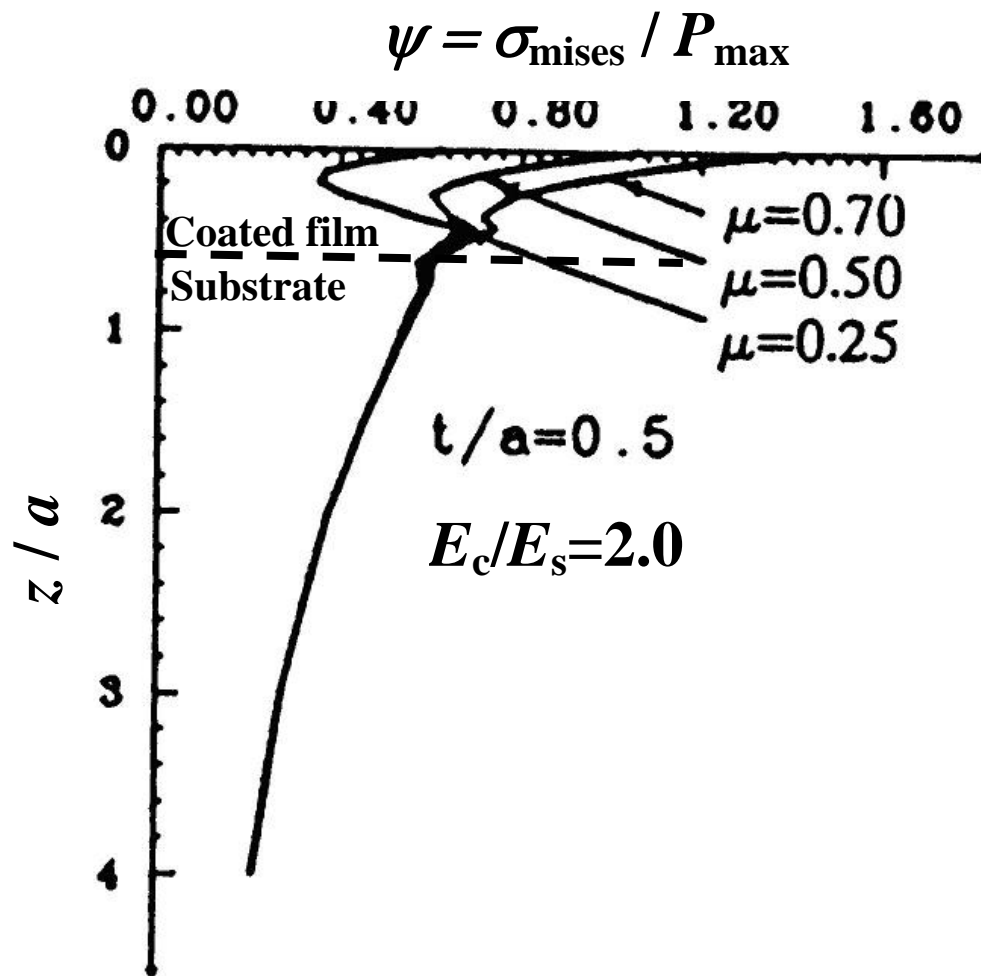
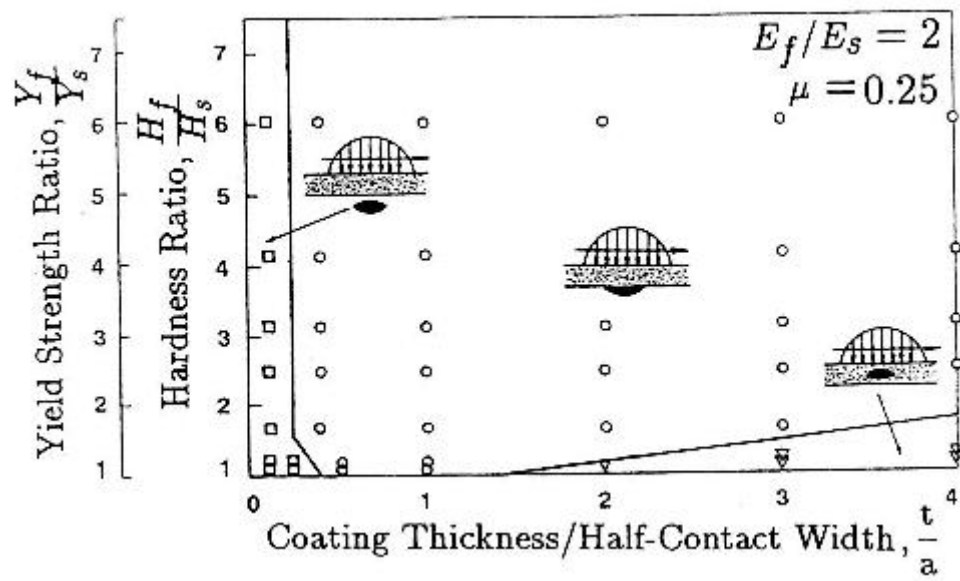
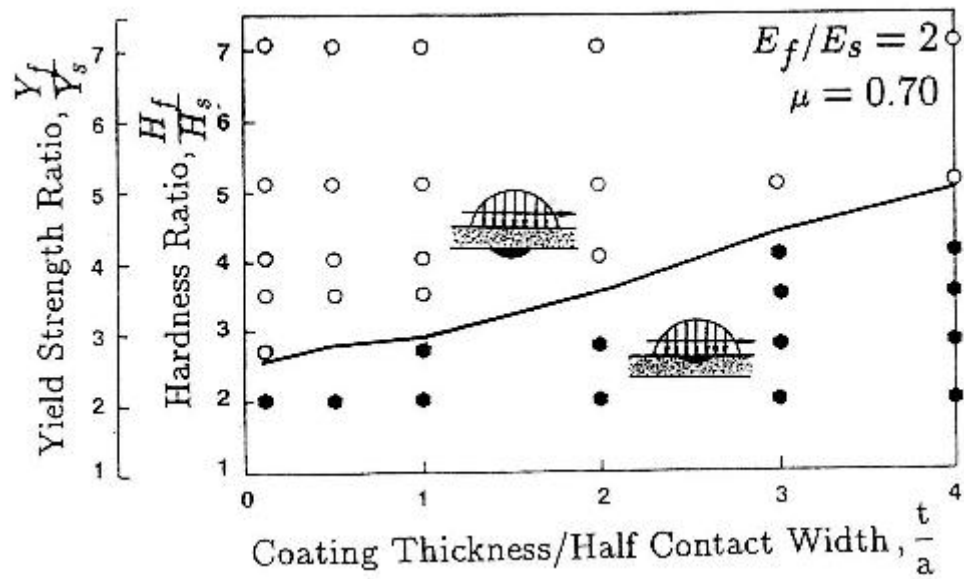


図 1.1 接触中心における深さ (Z 軸) 方向の $\sigma_{\text{mises}} / P_{\text{max}}$ の分布図^[1.6]



(a) $\mu=0.25$ の場合



(b) $\mu=0.70$ の場合

図 1.2 von Mises の降伏応力の最大値が発生する位置を示した図^[1.7]

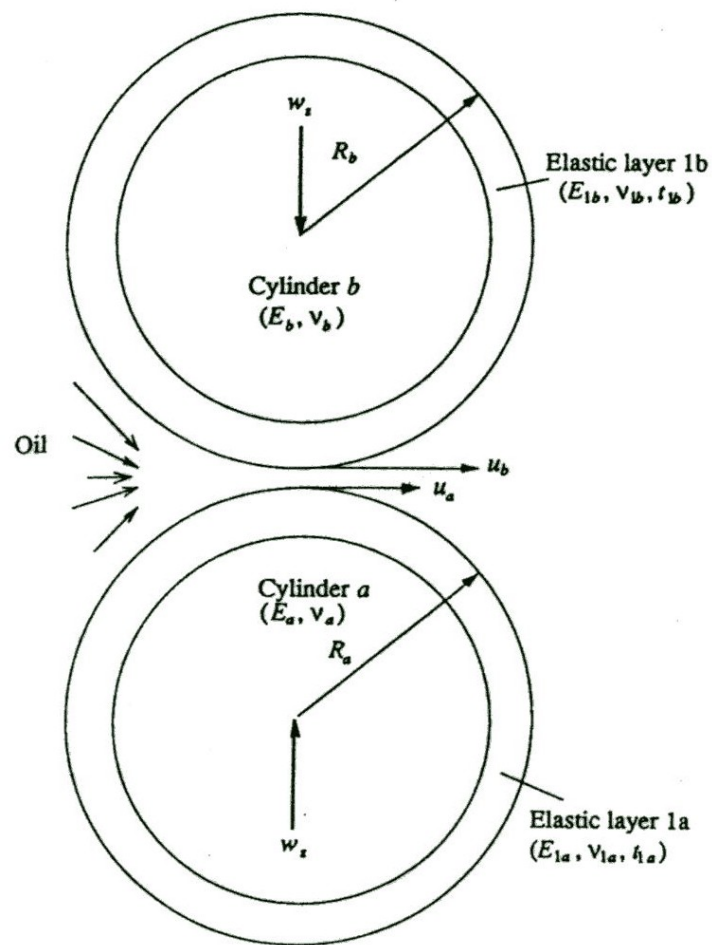


図 1.3 A.A.Elsharkawy らが研究対象とした 2 つの半無限弾性円柱モデル^[1.9]

1. 3. 3 黒田成昭らの研究^[1.10]

黒田成昭らは、コーティング膜が施された平板上を円筒が弾性流体潤滑下で転がり滑りする場合を対象とし、油膜圧力および油膜厚さについて解析し考察を行った。その結果、コーティング膜のヤング率 E_c が下地金属のヤング率 E_s より大きい硬質皮膜が被覆されている場合には、コーティング膜の厚さ T_c がより大きくなると、最大圧力値が大きくなることがわかった。これは、コーティング膜が薄い場合には下地金属の性質が支配的となるのに対して、コーティング膜が厚い場合にはコーティング膜の性質が支配的であるためと考えられている。

この研究では、A.A.Elsharkawy らの研究^[1.9] と同様に、線接触条件下で解析が行われており、コーティング膜および下地金属に生じる内部応力については解析が行われていない。

1. 3. 4 岩本勝美らの研究^{[1.11]~[1.13]}

岩本勝美らは、図 1.4 に示すコーティング膜が施された平板上を円筒が弾性流体潤滑下で転がり滑りをする場合を対象とし、コーティング膜内の応力状態を解析し考察を行った。

その結果、コーティング膜のヤング率 E_c と下地金属のヤング率 E_s の比 E_c/E_s がより大きくなると、コーティング膜表面の円筒回転方向の最大応力値およびコーティング膜と下地金属との界面における円筒回転方向の最大応力値と最大せん断応力値はより大きくなることがわかった。また、コーティング膜が薄い場合ほど、コーティング膜と下地金属との界面における円筒回転方向の最大応力値はより大きくなることがわかった。

この研究では、A.A.Elsharkawy らの研究^[1.9] および黒田成昭らの研究^[1.10] と同様に、線接触条件下で解析が行われており、点接触条件下での解析は行われていない。

1. 4 本研究の目的と研究方針

一般に、機械要素のしゅう動部における接触形態は点接触、線接触および面接触到に分類される^[1.14]。前節で示した従来の研究^{[1.6]~[1.8]}では、無潤滑下で使用されるコーティング膜内の応力については解析され考察が行われている。また弾性流体潤滑下で線接触条件下にある場合について、油膜圧力、油膜厚さならびに単層のコーティング膜内および下地金属内で生じる応力を解析し、考察が行われている。しかしながら、弾性流体潤滑で点接触条件下で使用されるコーティング膜の応力状態およびこの条件下での油膜圧力と油膜厚さは解析されていない。その理由として、線接触条件下での応力状態は、線接触方向に応力分布が変化しないと仮定することにより、二次元解析が可能であるのに対して、点接触条件下での応力状態は、三次元解析が必要であり、その場合、計算機の性能による制約上、変位の計算格子を多く確保できず、精度の高い解析が困難であるためと考える。しかしながら実際には、

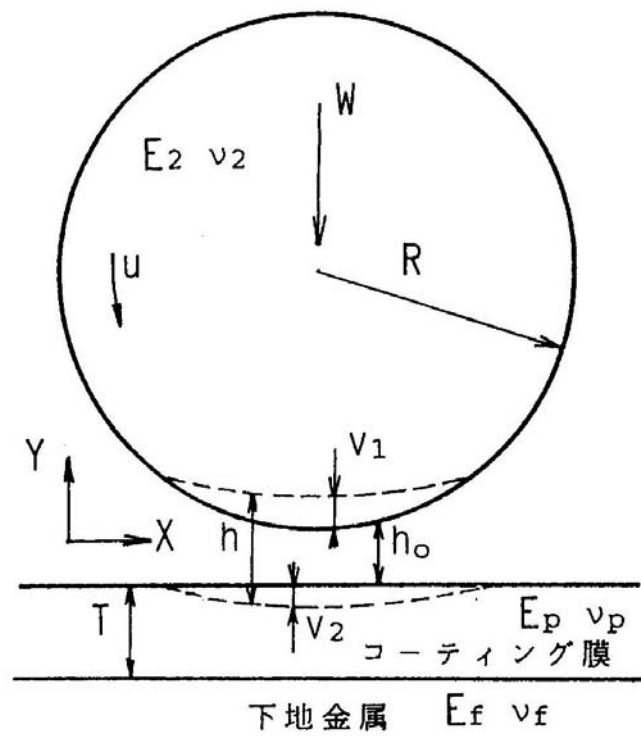


図 1.4 岩本勝美らが研究対象としたコーティング膜が施された半無限体と円筒のモデル^{[1.11]~[1.13]}

しゅう動部が点接触となっている機械要素が多数使用されているので、コーティング膜の最適設計の指針を得るためには点接触条件下におけるコーティング膜の応力を正確に把握することが実用上欠かせないと考え、またコーティング膜の設計指針を得るためには、潤滑油膜の厚さが適度に確保されなければ、固体面は直接接触して損傷を生じる可能性がある、潤滑油膜の厚さについてもコーティング膜の内部で生じる応力と同様に解析し評価を行うことが必要である。

そこで本研究では、点接触弾性流体潤滑下で使用するコーティング膜を対象とし、コーティング膜の機械的特性を測定により明らかにし、さらにコーティング膜および下地金属のみならず、中間層および傾斜層がある場合まで拡張し内部応力および固体二面間の油膜厚さを解析し考察を行う。さらに、それらの結果をもとにコーティング膜の最適設計の指針を提案することを研究目的とする。

この研究目的を達成するために、以下のような方針で研究を進める。

- (1) コーティング膜が施された平板上を球が弾性流体潤滑下で転がり滑りをする場合、すなわち点接触条件下における中間層および傾斜層を含むコーティング膜内および下地金属内で生じる応力ならびに油膜厚さの解析法を構築する。
- (2) 構築した解析法を用いて、各種コーティング膜が点接触弾性流体潤滑下で使用される際にコーティング膜および下地金属内で生じる応力ならびに油膜厚さを解析し、考察を行う。
- (3) さらにコーティング膜と下地金属との間に中間層および傾斜層がある場合についても、構築した解析法を用いて、同様の解析を行い、中間層および傾斜層が内部応力分布ならびに油膜厚さに与える影響について考察を行う。
- (4) 下地金属の損傷を防止する目的でコーティング膜を施す場合、材料内部で生じる最大応力値は小さく、かつ最大応力は下地金属内で生じるのではなく、中間層および傾斜層を含むコーティング膜内で生じる事が望ましいと考える。また、固体面同士の直接接触による損傷を防止するためには、潤滑膜は厚いほうが望ましいと考える。以上の観点から(2)および(3)で得られた内部応力ならびに油膜厚さの解析結果をもとにコーティング膜の設計指針を明らかにする。

1. 5 本論文の構成

本論文は、全7章と付録より構成されており、本論文の構成とその概要は以下の通りである。

第1章「緒論」では、本研究の背景を示し、表面改質および本研究に関連した従来の研究について触れ、本研究に関連する問題点を明確にした上で、本研究の目的および研究方針について述べる。

第2章「コーティング膜の内部応力と油膜厚さの解析方法」では、下地金属上にコーティング膜が施され、そのコーティング膜上を球が点接触で弾性流体潤滑下で転がりすべりをするモデルに対し、コーティング膜の内部応力ならびに油膜厚さを解析する手法について述べ、本解析手法の信頼性を評価する。

第3章「一層のコーティング膜の応力分布と油膜厚さ」では、第2章に述べている解析手法を用いて得られた、コーティング膜および下地金属の応力分布ならびに油膜厚さの解析結果を示し、考察を行う。

第4章「中間層を有するコーティング膜の応力分布と油膜厚さ」では、コーティング膜と下地金属との間に、双方とは性質が全く異なる中間層が施されたモデルに対し、第2章で示した解析手法を応用し同様の解析を行い、その結果得られたコーティング膜、中間層および下地金属の応力分布ならびに油膜厚さの解析結果を示し、考察を行う。

第5章「傾斜層を有するコーティング膜の応力分布と油膜厚さ」では、コーティング膜と下地金属との間に、下地金属の性質からコーティング膜の性質へ徐々に性質が変化する傾斜層が施されたモデルに対し、第2章で示した解析手法を応用し同様の解析を行い、その結果得られたコーティング膜、傾斜層および下地金属の応力分布ならびに油膜厚さの解析結果を示し、考察を行う。

第6章「コーティング膜の設計指針」では、本研究で得られた結果をもとに、弾性流体潤滑下で使用されるコーティング膜の設計指針について、中間層および傾斜層がある場合まで拡張し論じる。

第7章「結論」では、本研究で得られた結論をまとめる。

本研究において構築した内部応力および油膜厚さの解析法を用いて、コーティング膜および下地金属内で生じる応力を解析し評価を行うためには、コーティング膜材の機械的特性のひとつであるヤング率が必要となる。そこで、本論文の末尾に付録として、組み合わせはりの原理を用いてコーティング膜材のヤング率を求め、他の研究により得られたヤング率値と比較し検討を行った結果を示す。この手法は、コーティング膜のヤング率を得る一つ的手段として有効であり、実際に使用されるコーティング膜のヤング率評価に適用可能であることが確認されたので付録とし、紹介する。

参考文献

- [1. 1] D. Dowson, G. R. Higginson : A Numerical Solution to the Elasto-hydrodynamic Problem, J. Mech. Eng. Sci, 1, 1 (1959), 6.
- [1. 2] 水谷嘉之：トライボ表面創製の考え方と実際，トライボロジスト，47，10 (2002), 733.
- [1. 3] 橋本巨著：基礎から学ぶトライボロジー，森北出版株式会社 (2006).
- [1. 4] 伊藤安孝：「表面改質技術」特集号発行によせて，トライボロジスト，52，1 (2006), 3.
- [1. 5] (社) 日本トライボロジー学会：第 53 回トライボロジー先端講座「表面改質・コーティング技術の最前線—表面はどこまで思い通りになるか—」教材.
- [1. 6] D. F. Diao, K. Kato, K. Hayashi : The local yield map of Hard Coating under Sliding Contact, Thin Film in Tribology, Elsevier, (1993), 419.
- [1. 7] D. F. Diao, K. Kato : Interface yield map of Hard Coating under Sliding Contact, Thin Solid Films, 245, (1994), 115.
- [1. 8] D. F. Diao : Local yield map of hard coating with an interlayer under sliding contact, 290, (1996), 221.
- [1. 9] A. A. Elsharkawy, B. J. Hamrock, : EHL of Coated Surfaces: Part 1 – Newtonian Results, ASME J. Tribol, 116, 1 (1994), 29.
- [1. 10] 黒田成昭，黒田一男：薄膜でコーティングされた面の弾性流体潤滑（定常解析），（社）日本トライボロジー会議予稿集（東京 1992-5），355.
- [1. 11] 岩本勝美，志摩政幸，佐藤準一：EHL 条件下における薄膜の応力状態，（社）日本トライボロジー会議予稿集（名古屋 1993-11），699.
- [1. 12] 岩本勝美，志摩政幸，佐藤準一：EHL 条件下における薄膜の応力状態（第 2 報），（社）日本トライボロジー会議予稿集（東京 1994-5），151.
- [1. 13] 岩本勝美，志摩政幸，佐藤準一：EHL 条件下における薄膜の応力状態（第 3 報），（社）日本トライボロジー会議予稿集（金沢 1994-10），523.
- [1. 14] (社) 日本トライボロジー学会編，トライボロジーハンドブック，養賢堂

第2章 コーティング膜の内部応力と油膜厚さの解析方法

2. 1 はじめに

コーティング膜の設計指針を得るためには、コーティング膜の損傷に直接起因するコーティング膜の内部応力を解析し評価を行うことが必要である。また、潤滑油膜の厚さが適度に確保されなければ、固体面は直接接触して損傷を生じる可能性がある。潤滑油膜の厚さについてもコーティング膜の内部で生じる応力と同様に解析し評価を行うことが必要である。

そこで本章では、コーティング膜の設計指針を得るために必要な、コーティング膜の内部応力ならびに油膜厚さを解析し評価を行うための方法について示す。

2. 2 ヘルツの接触理論

二つの固体が接触して荷重を受けると、接触部分が弾性変形して接触領域を形成し、接触圧力が生じる。接触領域が固体の表面積に比べて十分に小さいときの接触をヘルツ接触という。接触領域、接触圧力および二つの固体の接近量の解析にはヘルツの接触理論^[2.1]が適用される。この理論は上記に加え、接触する前の表面には粗さがなく、固体は等質等方性弾性体であり、荷重は接触領域に垂直に作用することが前提条件である^[2.2]。

2. 3 解析モデル

本研究では、点接触弾性流体潤滑下で使用されるコーティング膜を研究対象とし、油膜厚さおよびコーティング膜内で生じる応力を解析する。

任意の曲面同士が曲面の表面積に比べて十分に小さい領域で接触する場合、その接触形態は点接触となる。ここで、全方向に対し曲率半径 R_1 を有する曲面と曲率半径 R_2 を有する曲面が接触している場合、すなわち曲率半径 R_1 の球と曲率半径 R_2 の球が接触している場合を考えると、その際の接触部の大きさ、面圧および弾性変形量は、ヘルツの接触理論^[2.1]より(2.1)式で示される等価曲率半径 R の球と平面が接触している際に生じる接触部の大きさ、面圧および弾性変形量と等価であると考えることができる^[2.3]。

$$R = \frac{(R_1 R_2)}{(R_1 + R_2)} \quad (2.1)$$

そこで本研究では、点接触弾性流体潤滑下で使用されるコーティング膜を対象とし、コーティング膜、中間層、傾斜層および下地金属内で生じる応力を解析するために、下地金属上に中間層および傾斜層を有するコーティング膜が施され、その上

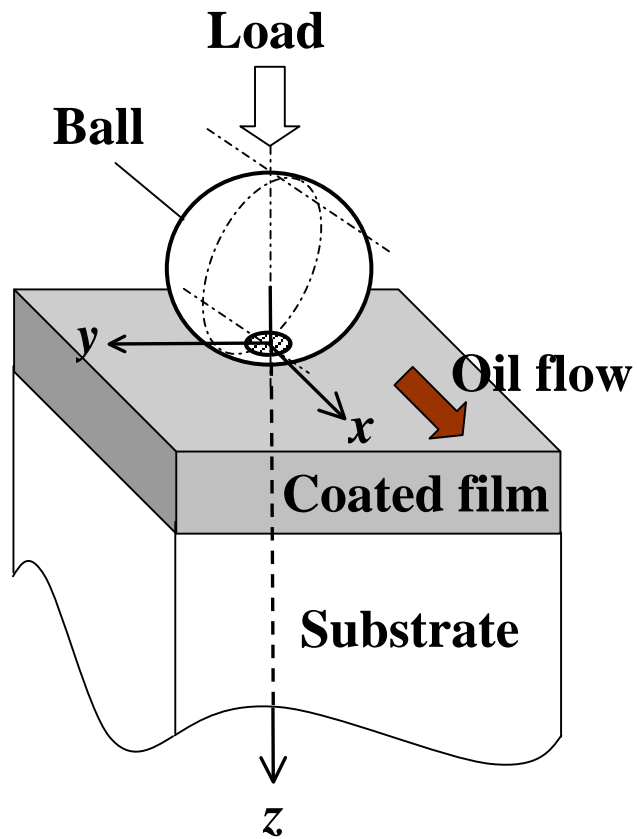
を球が弾性流体潤滑下で転がり滑りをする簡単なモデルを使用し解析を行う．図 2.1(a), (b)に本研究で使用する解析モデルを示す．

図 2.1(a)は，下地金属上にコーティング膜が一層施された場合，図 2.1(b)は，下地金属とコーティング膜との間に中間層および傾斜層が施されたモデルである．それぞれの解析モデルに対して油膜解析およびコーティング膜の応力解析を行う． x 方向は球の転がり滑り方向，すなわち潤滑油の流れる方向， y 方向はそれと垂直な方向， z 方向は鉛直方向をそれぞれ示す． x, y 座標の原点は接触中心であり， $z=0.0$ はコーティング膜表面とする．下地金属に薄膜コーティングが施され，その上が潤滑面となり，球が x 方向に転がり滑りをするものとする．また球には鉛直方向 (z 負方向)に高荷重が負荷され，球とコーティング膜との間の潤滑油内に高压が生じ，球，コーティング膜，中間層，傾斜層および下地金属は弾性変形するものとする．

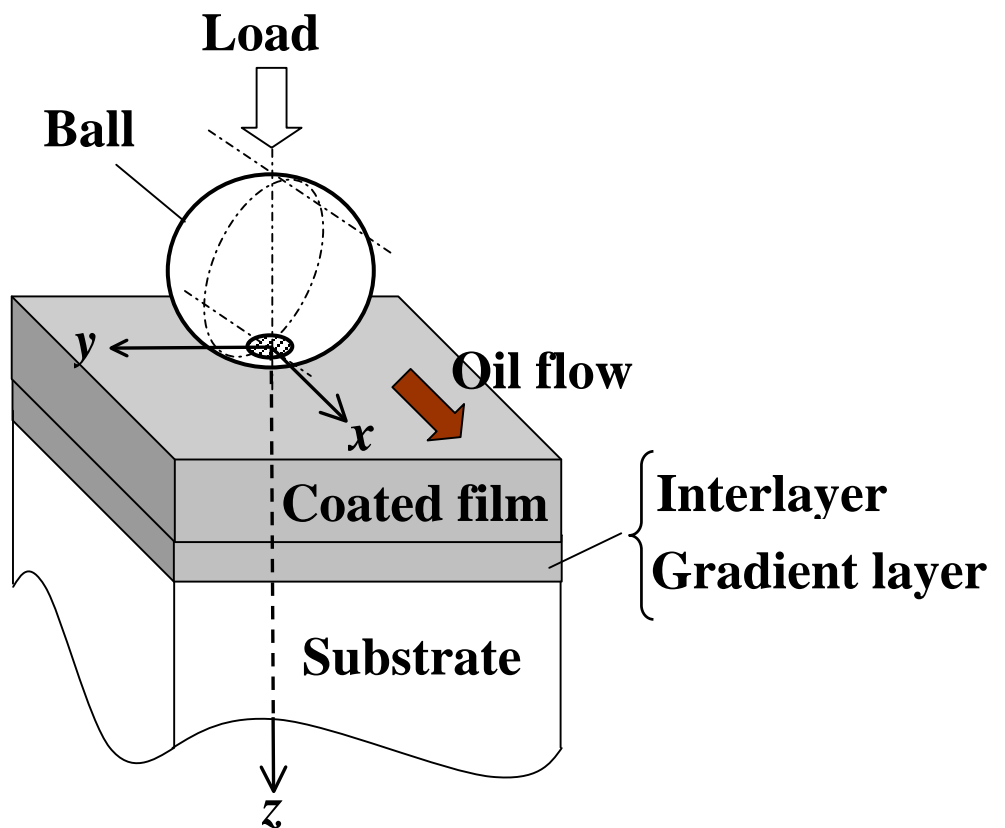
2. 4 解法方法

弾性流体潤滑では，潤滑面で発生する油膜圧力により潤滑面が弾性変形し，その結果油膜形状が変化する．このようなことを考慮して油膜解析を行うには，レイノルズ方程式を数値収束解法により解いて油膜圧力を求めるだけでなく，潤滑面の弾性変形量を計算し，油膜形状を修正して油膜圧力を再計算する収束計算を行わなければならない．

さらに潤滑油の粘度および密度は，潤滑油内に生じる油膜圧力の増加に対して指数関数的に増加する^[2, 4]．通常の流体潤滑下における潤滑油内に生じる油膜圧力は，弾性流体潤滑下で生じる油膜圧力ほど高压にはならない．従って，油膜圧力の変化による潤滑油の粘度と密度の変化は非常に小さいので，レイノルズ方程式を解く際に潤滑油内の油膜圧力の変化による潤滑油の粘度と密度の変化を考慮する必要がない．しかし，弾性流体潤滑では潤滑油膜内に GPa オーダーの非常に高い圧力が発生するために，潤滑油の粘度と密度を考慮して解析を行う必要がある．このようにして得られた油膜圧力から変位を求め，それを用いてコーティング膜，中間層，傾斜層および下地金属の内部に生じる応力を解析し評価を行う．



(a) コーティング膜のみの場合



(b) 中間層もしくは傾斜層がある場合

図 2.1 解析モデル

2. 5 油膜解析

2. 5. 1 構成方程式の無次元化

油膜圧力と油膜厚さの関係は(2.2)式の二次元レイノルズ方程式を解くことにより得られる．解析で使した二次元のレイノルズ方程式を以下に示す．

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 12u_m \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \quad (2.2)$$

ここで $u^m = \frac{(u^b + u^c)}{2}$ である．(2.2)式を無次元化するために、次の変数をおく．

$$X = \frac{x}{a}, \quad Y = \frac{y}{a}, \quad P = \frac{p}{p_h}, \quad H = \frac{hR_x}{a^2}, \quad \eta^* = \frac{\eta}{\eta_0},$$

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad U = \frac{u^m \eta_0}{R_x E'}, \quad W = \frac{F}{R_x^2 E'}, \quad G = \alpha E' \quad (2.3)$$

(2.3)式の諸量を用いて(2.2)式を無次元化すると次式を得る．

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\xi \frac{\partial P}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[\xi \frac{\partial P}{\partial Y} \right] = \frac{\partial(\rho^* H)}{\partial X} \quad (2.4)$$

ここで、 $\xi = \frac{\rho^* H^3}{\eta^* \lambda}$, $\lambda = \frac{12u_m \eta_0 R_x^2}{a^3 p_h}$ となる．

(2.2)式中の潤滑油の粘度 η は、粘度と圧力の関係を表す Roeland の式^[2.5]より算出し、次式で与えられる．

$$\eta = \eta_0 \exp \left\{ \left(\ln(\eta_0) + 9.67 \right) \left(-1 + \left(1 + \frac{P}{P_0} \right)^\gamma \right) \right\} \quad (2.5)$$

(2.5)式を(2.3)式の諸量を用いて無次元化すると次式を得る．

$$\eta^* = \exp \left\{ \left(\ln(\eta_0) + 9.67 \right) \left(-1 + \left(1 + \frac{P_h}{P_0} P \right)^\gamma \right) \right\} \quad (2.6)$$

ここで $\eta_0 = 0.0400 [\text{Pa} \cdot \text{s}]$, $p_0 = 1.96 \times 10^8 [\text{Pa}]$, $\gamma = 0.67$ である．(2.6)式は、(2.4)式中の無次元粘度 η^* である．また(2.2)式中の密度 ρ は、密度と圧力関係を示す Dowson-Higginson の式^[2.8]より算出し、次式で与えられる．

$$\rho = \frac{5.9 \times 10^8 + 1.34 p}{5.9 \times 10^8 + p} \quad (2.7)$$

(2.7)式を(2.3)式の諸量を用いて無次元化すると次式を得る．

$$\rho^* = \frac{5.9 \times 10^8 + 1.34 p_h P}{5.9 \times 10^8 + p_h P} \quad (2.8)$$

(2.8)式は，(2.4)式中の無次元密度 ρ^* である．(2.2)式中の油膜厚さ H は，次式で示される．

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R_x} + \frac{y^2}{2R_x} + v^b + v^c \quad (2.9)$$

(2.9)式右边第2項および右边第3項は，図2.2(a)，(b)に示す幾何学的に得られる諸量である．また球の弾性変形量 v^b およびコーティング膜表面の弾性変形量 v^c は，図2.2(a)，(b)のように示される．

(2.9)式を(2.3)式の諸量を用いて無次元化すると次式を得る．

$$H = H_0 + \frac{X^2}{2} + \frac{Y^2}{2} + V^b + V^c \quad (2.10)$$

ここで， $V^b = \frac{v^b R_x}{a^2}$ ， $V^c = \frac{v^c R_x}{a^2}$ である．

また，(2.11)式右边に示される油膜圧力を積分したものは油膜反力であり，この油膜反力は，球に負荷される負荷荷重 F と釣合っていないといけない．そこで負荷荷重と油膜反力の釣合い式は次式で示される．

$$F = \iint p(x, y) dx dy \quad (2.11)$$

(2.11)式を(2.3)式の諸量を用いて無次元化すると次式を得る．

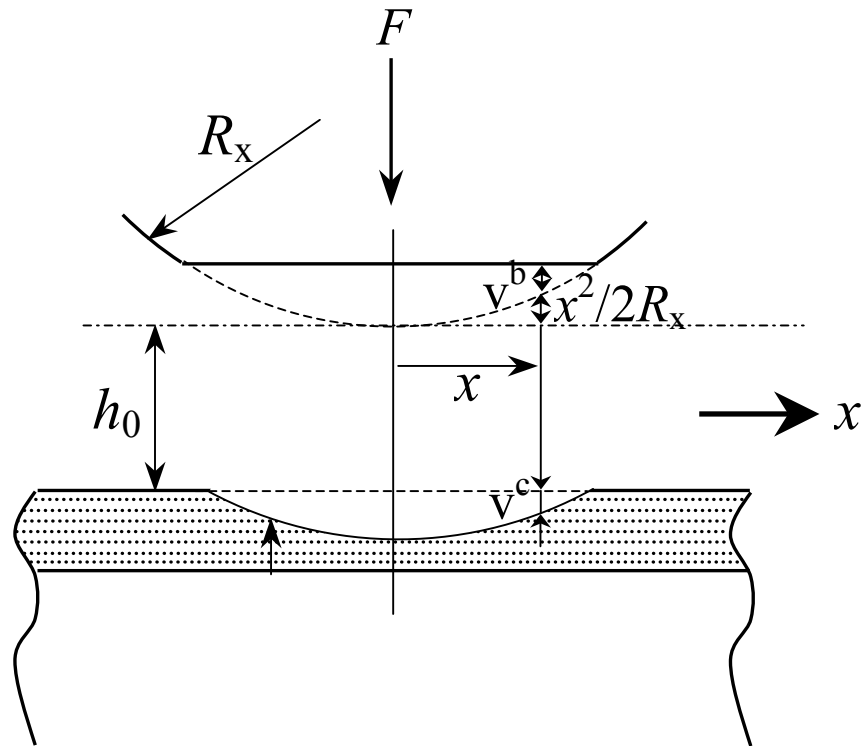
$$\frac{F}{a^2 p_h} = \iint P(x, y) dX dY \quad (2.12)$$

となる．

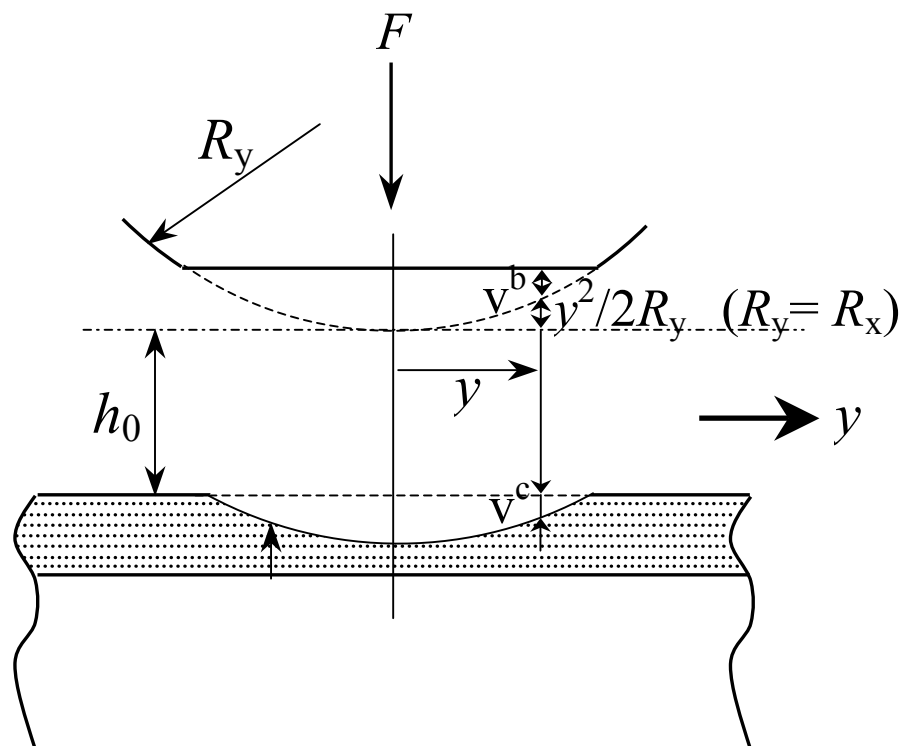
2. 5. 2 数値解析の手法

弾性流体潤滑下における油膜圧力および油膜厚さを得るためには，(2.4)式に示した流体潤滑の支配方程式であるレイノルズ方程式と，(2.10)式に示した弾性変形量を考慮した油膜厚さ算出式および(2.12)式に示した作用外力と油膜反力の釣合い式の連立解を，(2.6)式に示した潤滑油の粘度式と(2.8)式に示した密度の式を考慮して求める必要がある．

(2.4)式に示すレイノルズ方程式は，油膜厚さ h が油膜圧力 p に依存しなければ，すなわち弾性変形が無視できるならば，油膜圧力 p に関する線形の偏微分方程式である^[2, 7]．しかし弾性流体潤滑では，油膜圧力が非常に高いために弾性変形量が大きくなる．従って油膜の解析において弾性変形を無視することができない．油膜圧力による弾性変形が無視できなくなると，油膜厚さ h は油膜圧力 p に依存するの



(a) x 方向の模式図



(b) y 方向の模式図

図 2.2 弾性流体潤滑下における接触部の模式図

でレイノルズ方程式は非線形となる．このような非線形の連立方程式の解析解を得るためには繰返し計算を行ない，収束解を得る必要がある^[2,7]．

本項では，本研究で用いた収束計算の解法について述べる．

図 2.3 に示すように球とコーティング膜表面との間の潤滑面を格子状に分割し， x 方向および y 方向の格子間隔をそれぞれ Δ_x ， Δ_y とする．この格子間隔 Δ_x ， Δ_y を a で割って無次元化したものを Δ_x ， Δ_y とし，(2.4)式に示すレイノルズ方程式を差分化すると，任意の点 (i, j) における無次元レイノルズ方程式は次式となる．

$$\begin{aligned} & \frac{\xi_{i-\frac{1}{2},j}P_{i-1,j} - \left(\xi_{i-\frac{1}{2},j} + \xi_{i+\frac{1}{2},j}\right)P_{i,j} + \xi_{i+\frac{1}{2},j}P_{i+1,j}}{\Delta_x^2} + \\ & \frac{\xi_{i,j-\frac{1}{2}}P_{i,j-1} - \left(\xi_{i,j-\frac{1}{2}} + \xi_{i,j+\frac{1}{2}}\right)P_{i,j} + \xi_{i,j+\frac{1}{2}}P_{i,j+1}}{\Delta_y^2} - \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$(\rho^* H) = 0$$

ここで

$$\xi_{i,j} = \frac{\rho_{i,j}^* H_{i,j}^3}{\eta_{i,j}^* \lambda}, \quad \lambda = \frac{12u_m \eta_0 R_x^2}{a^3 p_h}$$

であり(2.13)式中の $\xi_{i\pm\frac{1}{2},j}$ ， $\xi_{i,j\pm\frac{1}{2}}$ は，次式で示される．

$$\begin{aligned} \xi_{i\pm\frac{1}{2},j} &= \frac{(\xi_{i,j} + \xi_{i\pm 1,j})}{2} \\ \xi_{i,j\pm\frac{1}{2}} &= \frac{(\xi_{i,j} + \xi_{i,j\pm 1})}{2} \end{aligned} \quad (2.14)$$

また，(2.13)式中の無次元粘度 $\eta_{i,j}^*$ ，無次元密度 $\rho_{i,j}^*$ ，および無次元油膜厚さ $H_{i,j}$ はそれぞれ次式で示される．

$$\eta_{i,j}^* = \exp \left\{ \left(\ln(\eta_0) + 9.67 \right) \left(-1 + \left(1 + \frac{p_h}{p_0} P_{i,j} \right)^\gamma \right) \right\} \quad (2.15)$$

$$\rho_{i,j}^* = \frac{5.9 \times 10^8 + 1.34 p_h P_{i,j}}{5.9 \times 10^8 + p_h P_{i,j}} \quad (2.16)$$

$$H_{i,j} = H_0 + \frac{X_i^2}{2} + \frac{Y_j^2}{2} + V_{i,j}^b + V_{i,j}^c \quad (2.17)$$

である． $i, j, i+1, j+1, i-1, j-1$ は，図 2.3 に示す各節点の添え字である．

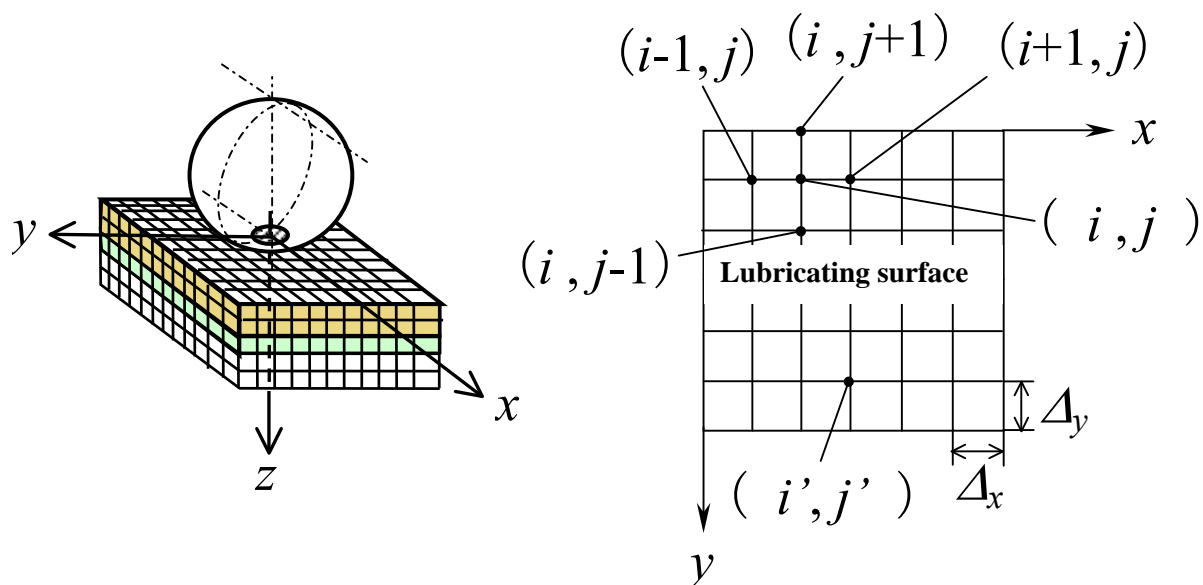


図 2.3 潤滑面の格子分割モデル

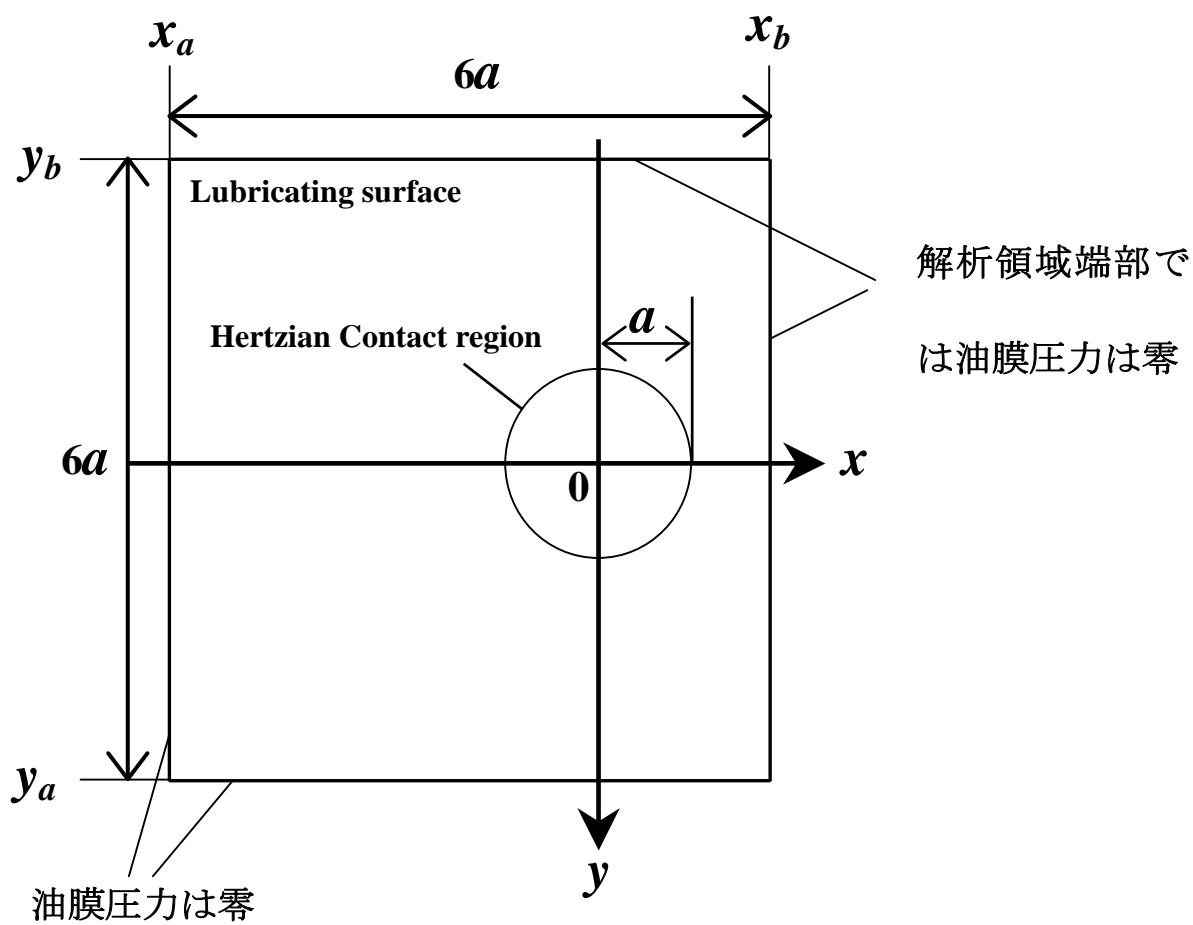


図 2.4 油膜の解析領域

本研究では、図 2.4 に示すように x 方向および y 方向それぞれヘルツ接触半幅 a の 6 倍の長さを解析領域とし、その領域を x 方向および y 方向それぞれ 240 分割して解析を行う。節点総数は 58081 となる。

(2.13)式中の (ρ^*H) は、低荷重の場合には(2.18)式が適用できる。

$$(\rho^*H) = \frac{\rho^*_{i+1,j}H_{i+1,j} - \rho^*_{i-1,j}H_{i-1,j}}{2\Delta_x} \quad (2.18)$$

しかしながら、弾性流体潤滑下の解析においては、高荷重が負荷されるために、(2.18)式を用いると収束しにくい。そこで次式を用いる。

$$(\rho^*H) = \frac{1.5\rho^*_{i,j}H_{i,j} - 2.0\rho^*_{i-1,j}H_{i-1,j} + 0.5\rho^*_{i-2,j}H_{i-2,j}}{4_x} \quad (2.19)$$

解析対象の端部においては、次式を用いる。

$$(\rho^*H) = \frac{\rho^*_{i,j}H_{i,j} - \rho^*_{i-1,j}H_{i-1,j}}{4_x} \quad (2.20)$$

(2.13)式から油膜圧力 P を求め、収束計算を行い最終的な収束解を得る。しかしながら、弾性流体潤滑では、潤滑油内に生じる油膜圧力は **GPa** オーダーの高圧となり、その油膜圧力の増加に対して潤滑油の粘度は指数関数的に増加することから、収束解を得るためには非常に多くの繰返し計算を必要とし、その結果、非常に長い計算時間を要する。

そこで近年、弾性流体潤滑の解析では大幅な計算時間の短縮を実現したマルチレベル法^[2,8]が使用される。マルチレベル法はレイノルズ方程式の緩和法による解法を高速化する手法と弾性変形計算を高速化する手法を含んでおり、通常の流体潤滑の解析でよく用いられる緩和法をベースとし、節点数が少ない粗い格子と解を求めたい節点数が多い細かい格子を用意し、粗い格子と細かい格子で計算を交互に行うことで計算速度の短縮と収束性の向上を実現した手法である。

このマルチレベル法を本研究の油膜解析に適用する場合、コーティング膜表面の弾性変形量を粗い格子と細かい格子でそれぞれ計算する必要がある。本研究において、コーティング膜表面の弾性変形量を得るためには、2.6 節で述べるようにあらかじめ影響係数を求めておく必要がある。従って、マルチレベル法を本研究の油膜解析に適用する場合には、粗い格子と細かい格子でそれぞれ影響係数を算出してから、コーティング膜表面の弾性変形量を計算する必要があるが、この作業は計算時間の観点から非効率的である。

そこで本研究では、粗い格子と細かい格子で計算を交互に行う事はせず、解を求めたい格子のみに対して、レイノルズ方程式の緩和法による解法を高速化する手法を用いて収束計算を行い、無次元油膜圧力および無次元油膜厚さを得る。以下にその手法について述べる。

従来の流体潤滑問題を，緩和法を用いて解く場合には各節点の油膜圧力 $P_{i,j}$ を修正し，(2.21)式により新たな油膜圧力 $P'_{i,j}$ を求める．

$$P'_{i,j} = P_{i,j} - \Omega_{gs} \frac{L_{i,j}}{\partial L_{i,j} / \partial P_{i,j}} \quad (2.21)$$

ここで $L_{i,j}$ は(2.13)式の左辺， Ω_{gs} は緩和係数をそれぞれ示す．

しかしながら弾性流体潤滑下の解析では，(2.21)式により圧力の修正を行なうと，その影響が近隣の節点の弾性変形量に及び，その結果として油膜厚さに大きな影響を与える．従って，潤滑油内に生じる油膜圧力が急激に増大し非常に高くなる領域，すなわち潤滑油の密度が高く油膜厚さが小さい領域では，油膜厚さは圧力修正の影響を敏感にうけるために， Ω_{gs} を相当小さく（0.1 以下）しても，収束解を得るのは容易ではない．

そこで弾性流体潤滑の場合には，油膜圧力が高くなるために潤滑油の密度が高く油膜厚さが小さくなる場合と油膜圧力が低くなるために密度が低く油膜厚さが大きくなる場合を分けて解析を行う必要がある．そこで本研究では潤滑油の密度が低く油膜厚さが大きい節点，すなわち ξ の値が大きい各節点においては，従来の流体潤滑の解析と同様に油膜圧力 $P_{i,j}$ を修正し，(2.21)式より新たな油膜圧力 $P'_{i,j}$ を求める．一方，潤滑油の密度が高く油膜厚さが小さい節点，すなわち ξ の値が小さい各節点においては，油膜圧力 $P_{i,j}$ を修正し，(2.22)式より新たな油膜圧力 $P'_{i,j}$ を求める．

$$P'_{i,j} = P_{i,j} - \Omega_{ja} \left(\delta_{i,j} - \frac{\delta_{i+1,j} + \delta_{i-1,j} + \delta_{i,j+1} + \delta_{i,j-1}}{4} \right) \quad (2.22)$$

(2.22)式を用いると，(2.21)式を用いた場合に比べて圧力の修正の影響が近隣の節点に対して小さくなり収束しやすくなる．ここで， Ω_{ja} は緩和係数である．

また

$$\delta_{i,j} = \frac{L_{i,j}}{\partial L_{i,j} / \partial P_{i,j} - \left(\partial L_{i,j} / \partial P_{i+1,j} + \partial L_{i,j} / \partial P_{i-1,j} + \partial L_{i,j} / \partial P_{i,j+1} + \partial L_{i,j} / \partial P_{i,j-1} \right) / 4} \quad (2.23)$$

$$\delta_{i\pm 1,j} = \frac{L_{i\pm 1,j}}{\partial L_{i\pm 1,j} / \partial P_{i,j} - \left(\partial L_{i\pm 1,j} / \partial P_{i+1,j} + \partial L_{i\pm 1,j} / \partial P_{i-1,j} + \partial L_{i\pm 1,j} / \partial P_{i,j+1} + \partial L_{i\pm 1,j} / \partial P_{i,j-1} \right) / 4} \quad (2.24)$$

$$\delta_{i,j\pm 1} = \frac{L_{i,j\pm 1}}{\partial L_{i,j\pm 1} / \partial P_{i,j} - \left(\partial L_{i,j\pm 1} / \partial P_{i+1,j} + \partial L_{i,j\pm 1} / \partial P_{i-1,j} + \partial L_{i,j\pm 1} / \partial P_{i,j+1} + \partial L_{i,j\pm 1} / \partial P_{i,j-1} \right) / 4} \quad (2.25)$$

で示される．

以上の方法を用いることにより， Ω_{gs} および Ω_{ja} に 0.2～1.0 程度の値を使用すれば，

繰返し計算時間を少なくし計算時間の短縮を図ることができる。

本研究においては、ヘルツ接触圧力^[2,1]を油膜圧力 P の初期値 $P^{(0)}$ として与え、 ξ の値が 0.3 より大きい場合には(2.21)式を、 ξ の値が 0.3 より小さい場合には(2.22)式をそれぞれ用いて収束計算を行う。緩和係数はそれぞれ $\Omega_{gs}=0.4$ 、 $\Omega_{ja}=0.2$ を用いる。

レイノルズ方程式を解く場合の境界条件は、図 2.4 に示されるように解析領域端部では油膜圧力は零とし、負圧が生じた場合においても零とする。

次に油膜厚さの計算方法について述べる。(2.10)式中の H_0 は、(2.26)式に示される Dowson-Hamrock の式から得られる値を初期値 $H_0^{(0)}$ とし、(2.27)式に示すように修正する。

$$H_0^{(0)} = 3.63G^{0.49}U^{0.68}W^{-0.073} \left(1 - e^{-0.70 \left(\frac{R_y}{R_x} \right)^{0.64}} \right) \quad (2.26)$$

$$H_0' = H_0 - \Omega_H (wf^{(0)} - wf') \quad (2.27)$$

ここで、(2.27)式中の $wf^{(0)}$ および wf' は次式で示される。

$$wf^{(0)} = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} P_{i,j}^{(0)} dXdY = \frac{F}{a^2 p_h} \quad (2.28)$$

$$wf' = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} P_{i,j}' dXdY \quad (2.29)$$

(2.28)式は油膜反力を無次元化した値を算出する式である。(2.29)式は、(2.21)式および(2.22)式より得られる修正された油膜圧力 P' での負荷力を求める式である。また Ω_H は緩和係数であり、本研究では 0.05 を用いる。

油膜圧力および油膜厚さの収束計算を行う際の、解の収束判定条件は次のように与える。

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} (P_{i,j}^{(k+1)} - P_{i,j}^{(k)})}{\sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} P_{i,j}^{(k)}} \leq 10^{-6} \quad (2.30)$$

ここで、 $P_{i,j}^{(k)}$ 、 $P_{i,j}^{(k+1)}$ はそれぞれ k 回目と $(k+1)$ 回目に求められた $P_{i,j}$ を示す。

2. 6 球およびコーティング膜の弾性変形量解析

球の無次元弾性変形量 V^b およびコーティング膜の無次元弾性変形量 V^c は、次式で示される。

$$V^b = \frac{v^b R_x}{a^2} \quad (2.31)$$

$$V^c = \frac{v^c R_x}{a^2} \quad (2.32)$$

ここで、 v^b および v^c は、球の弾性変形量およびコーティング膜の弾性変形量であり、それぞれ弾性方程式を数値積分した次式で示される。

$$v_{i,j}^b = \sum_{i'=1}^{n_x} \sum_{j'=1}^{n_y} D_{[i-i'],[j-j']}^b p_{i',j'} \quad (2.33)$$

$$v_{i,j}^c = \sum_{i'=1}^{n_x} \sum_{j'=1}^{n_y} D_{[i-i'],[j-j']}^c p_{i',j'} \quad (2.34)$$

ここで $D_{[i-i'],[j-j']}^b$ および $D_{[i-i'],[j-j']}^c$ は、図 2.5 に示されるように、節点 $(x_{i'}, y_{j'})$ を図心とする領域に一樣に作用する単位圧力により、球およびコーティング膜にある節点 (x_i, y_j) に生じる変位の影響係数である。

球表面の変位の影響係数は、ヘルツの接触理論^[2.11]より得ることができ、次式で示される。

$$D_{i,j}^b = \frac{(1-\kappa_b^2)}{\pi E_b} \int_{y_j-A_y/2}^{y_j+A_y/2} \int_{x_i-A_x/2}^{x_i+A_x/2} \frac{dx_{i'} dy_{j'}}{\sqrt{(x_i-x_{i'})^2 + (y_j-y_{j'})^2}} \quad (2.35)$$

ここで、 A_x および A_y は、図 2.3 における正方形領域の一辺の長さをそれぞれ示す。しかしながら、コーティング膜の変位の影響係数 $D_{[i-i'],[j-j']}^c$ は、下地金属上に、下地金属の物性とは異なるコーティング膜が施されているために、ヘルツの接触理論から得ることはできない。三次元有限要素法^[2.9]を用いて、コーティング膜の弾性変形量を算出することも考えられるが、その場合、計算機の性能による制約上、計算格子を多く確保できないために高い解析精度が得られない。そこで本研究では、高い解析精度を得るために、三次元軸対称有限要素法を用いてコーティング膜を施した材料の変位の影響係数を算出し、その影響係数を用いて、油膜圧力により生じる各節点の変位を(2.34)式より得る^[2.10]。図 2.6 に三次元軸対称解析モデルを示す。潤滑面に生じる変位の影響係数の解析において、三次元軸対称問題として解析を行うために、正方形領域($A_x=A_y$)と面積の等しい円に単位圧力が作用することを考える。円に単位圧力が作用する場合を考えると、 360° どの半径方向においても円中心から等距離にある点の影響係数は等しくなる。従って、円中心上を対称軸とみなし一方向に対して、対称軸から任意の距離における影響係数を算出すればよいことから、影響係数は二次元で解析することが可能となり、節点数を十分確保することができ、

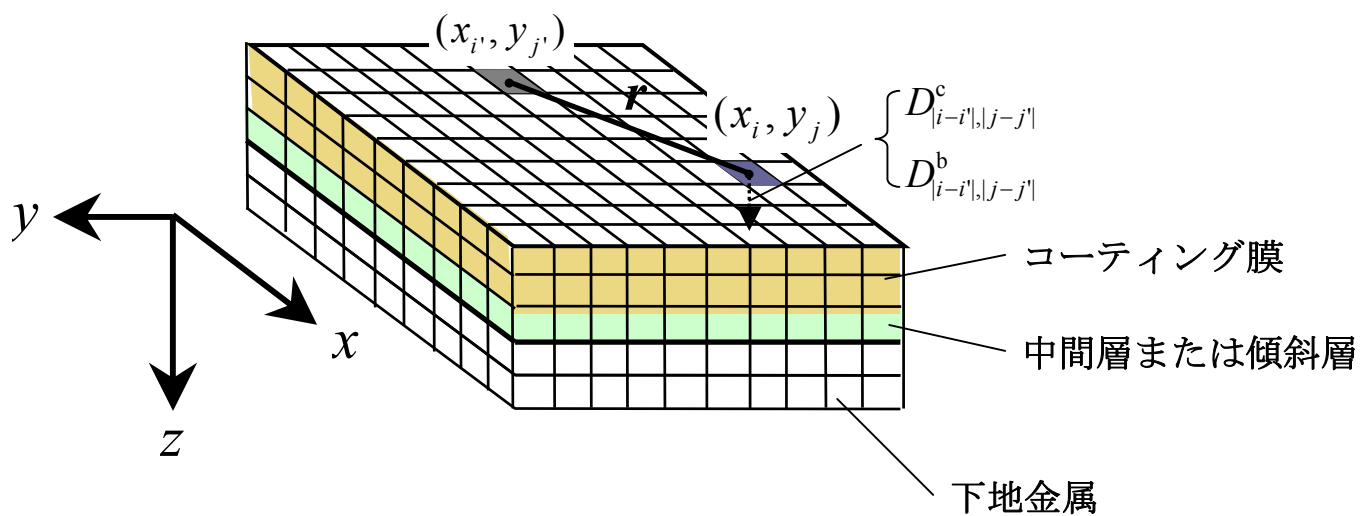


図 2.5 変位の影響係数

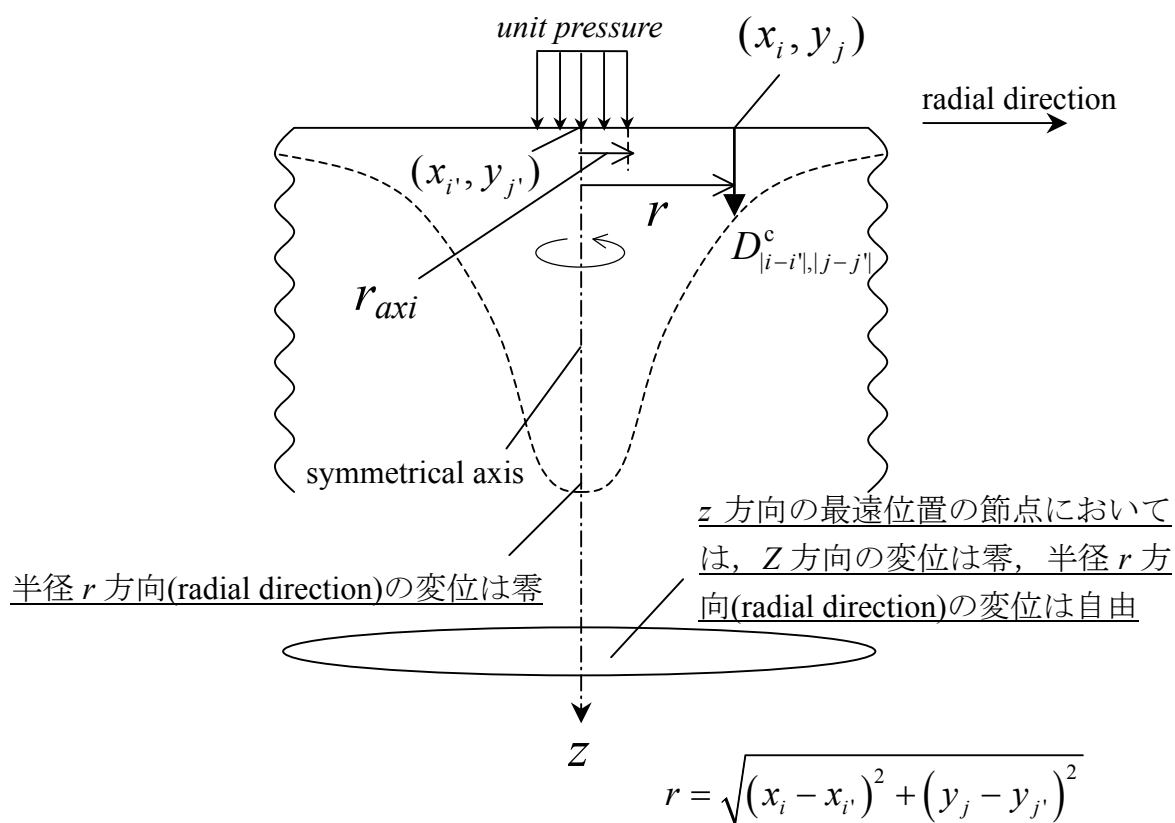


図 2.6 変位の影響係数

コーティング膜および下地金属のより精度の高い変形量および応力分布を得ることができる。コーティング膜を施した材料の表面変位の影響係数を得る際に用いる解析領域は、半径 r 方向 (図 2.6 中の radial direction) には荷重作用半幅 $r_{axi}(=0.564\Delta_x, \Delta_x=\Delta_y)$ の約 1114 倍、材料表面に対して垂直な z 軸方向には r_{axi} の約 2042 倍とし、それぞれを 946 分割、1410 分割して三角形要素を作成し解析を行う。本来、解析領域は無限に広いことが望ましいが、計算機の性能による制約上、上記の解析領域とし、その解析領域内において、図 2.6 に示すように z 方向対称軸上の節点については、 z 軸方向変位は自由とし半径 r 方向変位は零、さらに解析領域内の最遠位置にある節点については、 z 軸方向変位は零とし、半径 r 方向変位は自由とする境界条件を設けて解析を行う。三次元軸対称有限要素法により得られる表面変位の影響係数は分割された節点に対するものであり連続的ではない。そこで任意の距離における影響係数は、各節点の影響係数を多項式で補間することにより求める。

2. 7 コーティング膜および下地金属の応力解析

中間層および傾斜層を含むコーティング膜および下地金属内に生じる垂直応力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ およびせん断応力成分 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ は、得られた各節点変位から三次元有限要素法^[2,9]を用いて算出する。

図 2.7 に示す通り、中間層および傾斜層を含むコーティング膜および下地金属を六面体の要素に分割し、さらに分割された六面体を、四面体の要素に分割し、それぞれの要素内における応力を三次元有限要素法を用いて解析する。以下にその手法について述べる。

各要素内の応力成分は、弾性理論より (2.36) 式に示される応力とひずみの関係式から得られる。

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\kappa)}{(1-\kappa)(1-2\kappa)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\kappa}{1-\kappa} & \frac{\kappa}{1-\kappa} & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & \frac{\kappa}{1-\kappa} & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ (sym) & & & \frac{1-2\kappa}{2(1-\kappa)} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\kappa}{2(1-\kappa)} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\kappa}{2(1-\kappa)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}$$

$$= [D]\{\varepsilon\} \quad (2.36)$$

(2.36) 式中のひずみ成分 $\{\varepsilon\}$ は (2.37) 式のように示される。

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_m & b_p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_i & c_j & c_m & c_p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_i & d_j & d_m & d_p \\ c_i & c_j & c_m & c_p & b_i & b_j & b_m & b_p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_i & d_j & d_m & d_p & c_i & c_j & c_m & c_p \\ d_i & d_j & d_m & d_p & 0 & 0 & 0 & 0 & b_i & b_j & b_m & b_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_m \\ u_p \\ v_i \\ v_j \\ v_m \\ v_p \\ w_i \\ w_j \\ w_m \\ w_p \end{Bmatrix}$$

$$= [B]\{u\} \quad (2.37)$$

[(2.36)式および(2.37)式の導出については付録 1 を参照]

(2.37)式中の u_I ($I= i,j,m,p$), v_J ($J= i,j,m,p$), w_K ($K= i,j,m,p$) に四面体要素を構成する各節点 i, j, m, p それぞれの x 方向変位, y 方向変位, z 方向変位を代入し, E および ν に四面体要素のヤング率およびポアソン比をそれぞれ代入し, 四面体要素内の垂直応力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ とせん断応力成分 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ を得る. また x - z 平面上の最大せん断応力 τ_{\max} および von Mises 応力 σ_{mises} は, 解析により得られた垂直応力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ とせん断応力成分 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ から得ることができ, 以下のように示される.

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left\{ \frac{(\sigma_x - \sigma_z)}{2} \right\}^2 + \tau_{zx}^2} \quad (2.38)$$

$$\sigma_{\text{mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right\} + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.39)$$

本研究において応力の解析で用いる計算領域は, x 方向および y 方向それぞれ, 油膜の解析と同様にヘルツ接触半幅 a の 6 倍の長さを解析領域とし, z 方向にはヘルツ接触半幅 a の 29 倍の長さとし, その領域を 60768000 個の要素に分割して解析を行った (図 2.7).

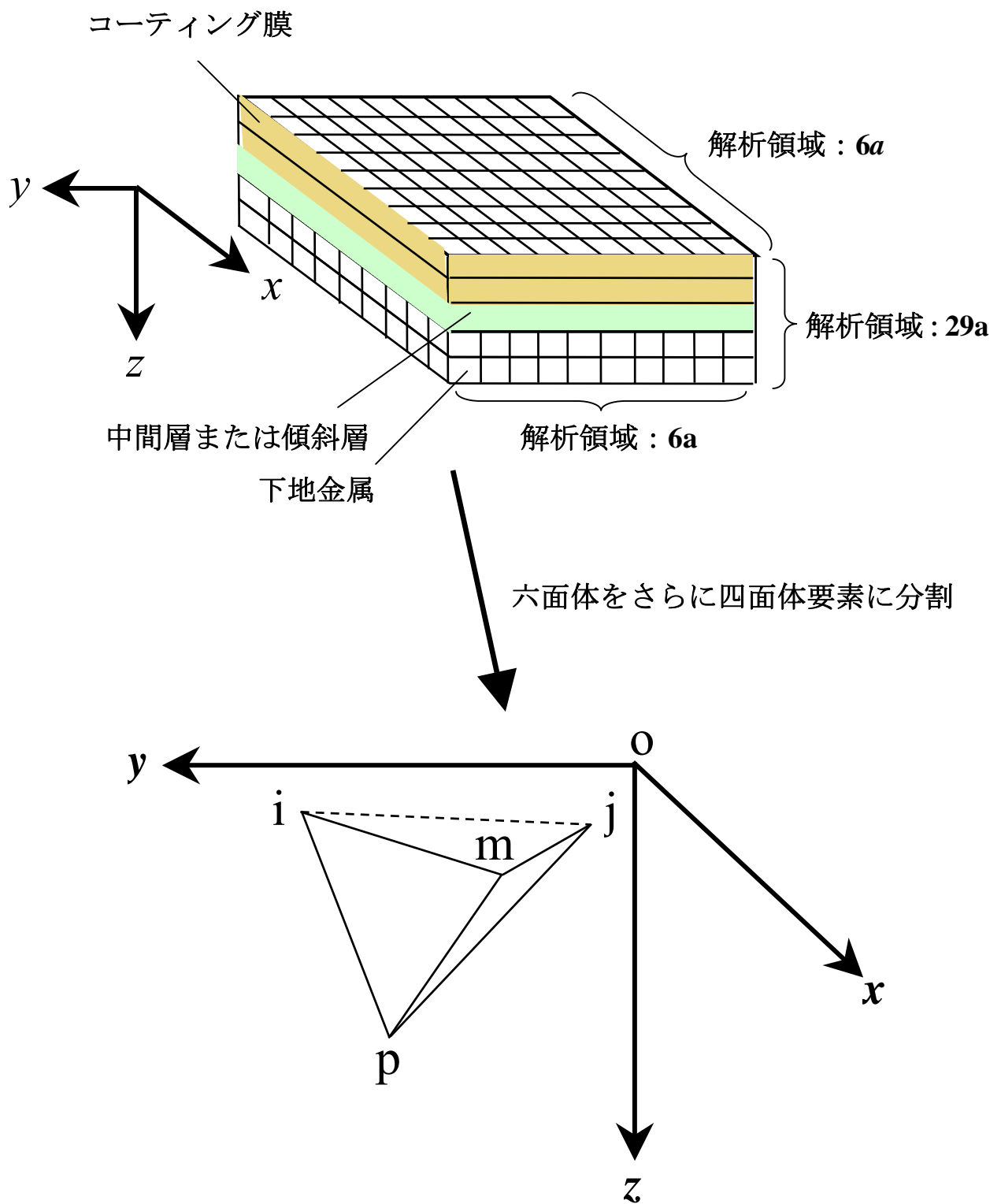


図 2.7 応力解析における要素分割

2. 8 最大ヘルツ圧力とヘルツ接触半幅の解析

図 2.8 は、コーティング膜を有する材料と球がヘルツ接触した場合を示す。本研究において、中間層および傾斜層を含むコーティング膜および下地金属に生じる応力は、球とコーティング膜を有する平面が直接接触した際の最大ヘルツ接触圧力 p_h とヘルツ接触半幅 a によって無次元化されている。通常、 p_h と a はヘルツの接触理論^[2.1]から容易に得ることができるが、下地にコーティング膜を施した材料と球の接触解析では、コーティング膜のヤング率、厚さにより p_h と a は異なるので、無次元化する際の p_h と a はあらかじめ、それぞれの条件に応じて求めておく必要がある。そこで本研究では、 p_h と a を求める際に以下に示す方法^[2.10]を用いる。

図 2.8 に示されるように、分割された各領域内では接触圧力は一定とすると、接触面内では各領域の図心位置 (i, j) において、次式で示される適合条件が成立する。

$$\delta - \sum_{i'=1}^{n_x} \sum_{j'=1}^{n_y} p_{i',j'} (D_{|i-i'|,|j-j'|}^c + D_{|i-i'|,|j-j'|}^b) = z_{i,j} \quad (i=1, 2, \dots, n_x), (j=1, 2, \dots, n_y) \quad (2.40)$$

ここで、 $p_{i',j'}$ は接触圧力、 $D_{|i-i'|,|j-j'|}^b$ は、(2.35)式より得られた球表面の変位の影響係数、 $D_{|i-i'|,|j-j'|}^c$ は、三次元軸対称有限要素法で得られた、コーティング膜の変位の影響係数、 δ は z 方向の相対接近量である。また $z_{i,j}$ は節点 (i, j) における、荷重が作用する前の初期すきまである。

力の釣合い条件は以下のように示される。

$$\sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} A_{i,j} p_{i,j} = F \quad (2.41)$$

$A_{i,j}$: 分割された各領域の面積、 F : 負荷荷重
また接触面内では、

$$p_{i,j} \geq 0 \quad (2.42)$$

の条件が成立する。

(2.40)式～(2.42)式を連立させ、すべてを満たす $p_{i,j}$ を求めることにより、接触面の大きさ、すなわちヘルツ接触半幅 a と、 $p_{i,j}$ の最大値である p_h および相対接近量 δ が得られる。

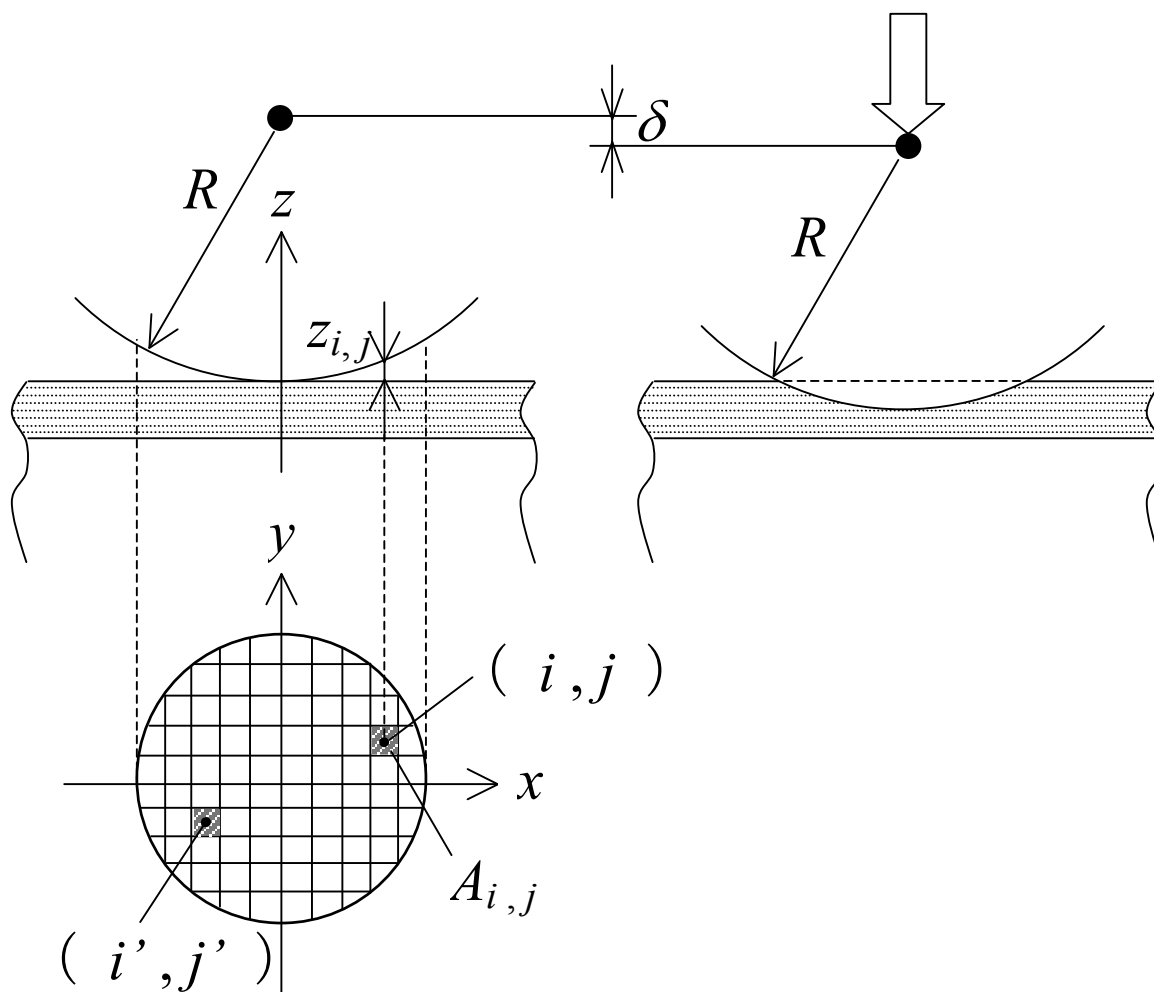


図 2.8 球とコーティング膜が接触した際の模式図および要素分割

2. 9 解析のフローチャート

- (1) 無次元速度および荷重パラメータを与える.
- (2) 次に無潤滑条件下での球とコーティング膜表面とのヘルツ接触圧力を油膜圧力 P の初期値 $P^{(0)}$ として与える. ($P^{(k)}=P^{(0)}$ とする)
- (3) Dowson-Hamrock の式より算出した最小油膜厚さを H_0 の初期値 $H_0^{(0)}$ として与える. ($H_0^{(k)}=H_0^{(0)}$ とする)
- (4) 油膜圧力 $P^{(k)}$ と $H_0^{(k)}$ より油膜厚さ $H^{(k)}$ を求める.
- (5) P での粘度 η^* と密度 ρ^* を求める.
- (6) 与えられた H , η^* , ρ^* からレイノルズ方程式を解き, 新しい $P^{(k+1)}$ を得る.
- (7) $P^{(k)}$ と $P^{(k+1)}$ から(2.30)式に示す収束判定を行い満たしていれば(8)へ行く. 満たしていなければ $P^{(k+1)}$ を(2.21)式および(2.22)式を用いて修正し, H_0 を (2.27)式を用いて修正し (4)に戻る.
- (8) 油膜圧力 P および油膜厚さ H を出力する.
- (9) 軸対称有限要素法を用いて中間層および傾斜層を含むコーティング膜および下地金属内の各節点における影響係数を算出し, その影響係数と得られた油膜圧力 P を用いて, 各節点の変位を算出する.
- (10) 得られた節点変位から三次元有限要素法を用いて応力を算出する.

2. 10 解析方法の検証

本解析方法の信頼性を検討するために, 最初にコーティング膜と下地金属の材質が同じ場合について, コーティング膜の表面変位の影響係数を解析し, ヘルツの接触理論^[2,1]より得られる理論値と比較した.

コーティング膜の厚さは $100\ \mu\text{m}$, コーティング膜および下地金属のヤング率は 206GPa , ポアソン比は 0.3 とし, $\Delta_x = \Delta_y = 1.0\ \mu\text{m}$ の領域に単位圧力が一様に負荷された場合, ヘルツの接触理論から得られる理論値と数値解析の結果を比較したものを図 2.9 に示す. 図 2.9 より, 表面変位の影響係数の解析値は理論値と非常によく一致していることがわかる.

次に, 鋼の下地に施された鋼製のコーティング膜と, 鋼球が直接接触している際の応力値, 接触領域および接触圧力をそれぞれ解析し, ヘルツの接触理論より得られる理論値と比較した. 球の直径は 32.0mm , ヤング率は 206GPa , ポアソン比は 0.3 , 負荷荷重は 10N とした. コーティング膜の厚さは $100\ \mu\text{m}$, コーティング膜および下地金属のヤング率は 206GPa , ポアソン比は 0.3 で解析を行った. 球とコーティング膜を有する平面の接触により生じる接触面積は円形であり, x 軸, y 軸に对称であるので, その四半円についてのみ計算し, 予想される接触領域を最大 16900 分割して解析を行った. その結果をヘルツの接触理論から得られる理論値と比較したものを図 2.10 に示す. 計算された接触圧力は, ヘルツの接触理論より定まる最大接触圧力 $p_{h,H}$ により無次元化され, 座標はヘルツの接触理論より定まる接

触半幅 a_H によりそれぞれ無次元化している．図 2.10 より接触領域および接触圧力の解析値と理論値は非常によく一致していることがわかる．

またコーティング膜，中間層および下地金属内に生じる応力について，ヘルツの接触理論から得られる理論値と数値解析の結果を比較した．その結果を図 2.11(a), (b)に示す．図 2.11(a)は中間層がない場合，図 2.11(b)はコーティング膜と下地金属との間に厚さ $50\text{ }\mu\text{m}$ の中間層がある場合の応力について理論値と比較した結果を示す．図 2.11(a), (b)より応力の解析値は，理論値と非常によく一致していることがわかる．

以上より，下地金属にコーティング膜が施された材料の応力評価に本解析方法が適用できることが検証された．

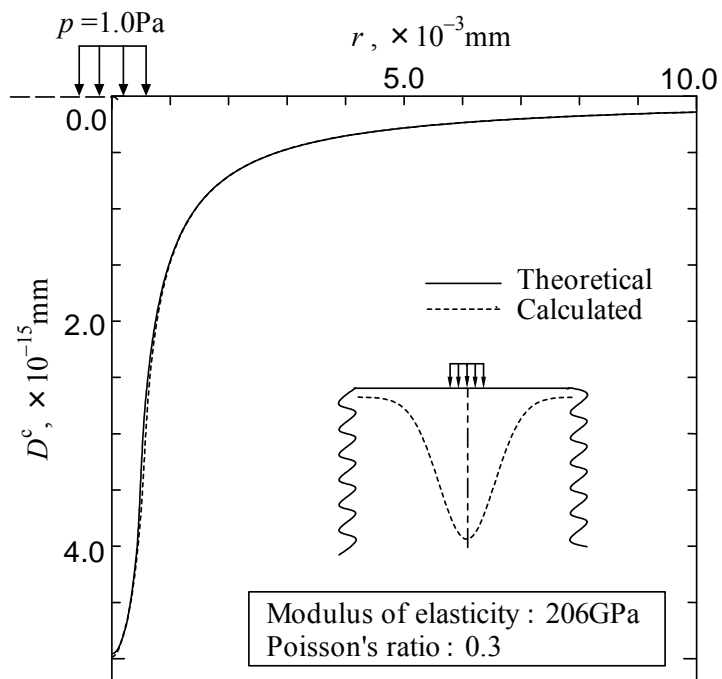


図 2.9 影響係数の解析値と理論値を比較した結果

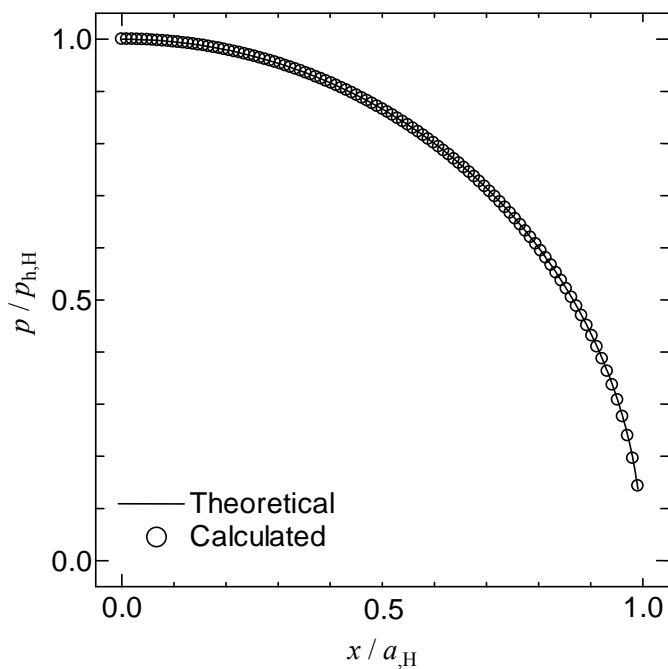
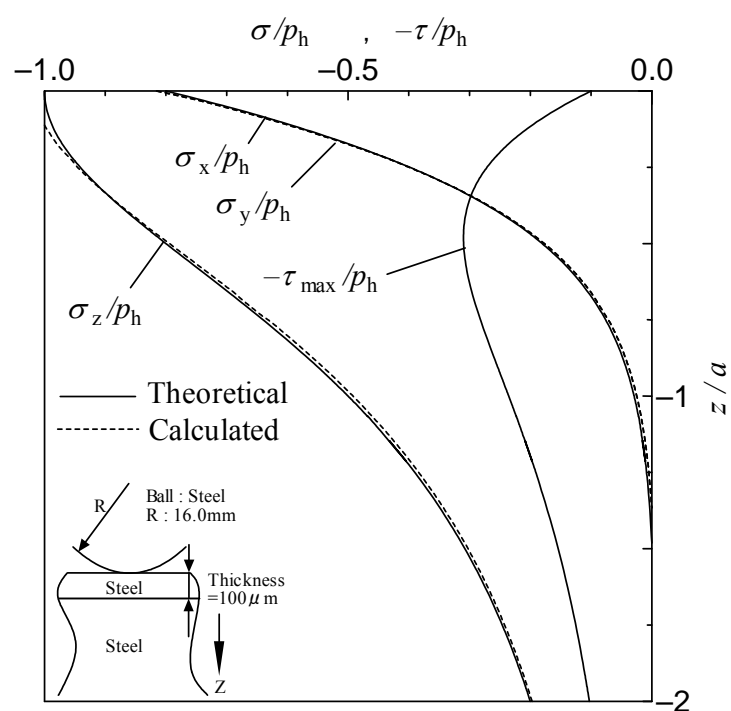
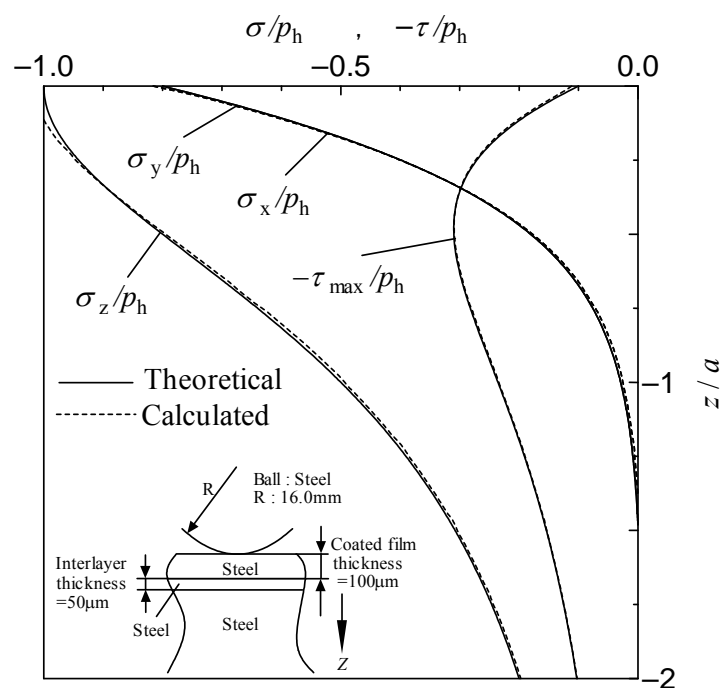


図 2.10 ヘルツ接触圧力の解析値と理論値を比較した結果



(a) 球とコーティング膜の接触



(b) 球と中間層を含むコーティング膜の接触

図 2.11 球とコーティング膜の接触時における内部応力の解析値と理論値を比較した結果

参考文献

- [2. 1] H. Hertz : The Contact of Elastic Solids, *J Reine Angew, Math*, 92, (1881), 156.
- [2. 2] 日本機械学会編:機械工学便覧 デザイン編β編 機械要素・トライボロジー, (2003).
- [2. 3] 日本トライボロジー学会編:トライボロジーハンドブック, 養賢堂, (2001).
- [2. 4] B. J. Hamrock, S. R. Schmid, B. O. Jacobson : Fundamentals of Fluid Film Lubrications (Second Edition), Macel Dekker Inc, (2004).
- [2. 5] C. J. A. Roeland : Correlation Aspect of the Viscosity-Temperature-Pressure Relation of Lubrication Oils, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Netherlands, (1966).
- [2. 6] D. Dowson, G. R. Higginson : Elasto-hydrodynamic Lubrication: The Fundamentals of Roller and Gear Lubrication, Oxford: Pergamon, (1966).
- [2. 7] 中原綱光: EHL 理論の現状と展望, トライボロジスト, 49, 4 (2004), 275.
- [2. 8] C. H. Venner, A. A. Lubrecht : Multilevel Methods in Lubrication, Elsevier, (2000).
- [2. 9] O. C. Zienkiewicz : The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill, (1971).
- [2. 10] 元田智弘, 志摩政幸, 佐々木信也 : 球の押込みによる耐摩耗被膜のヤング率測定システムの構築, トライボロジスト, 48, 6 (2003), 503.

第3章 一層のコーティング膜の応力分布と油膜厚さ

本章では、第2章に示した解析方法を用いて、図2.1(a)に示される下地金属上にコーティング膜が一層施されたモデルについて、油膜圧力、油膜厚さならびにコーティング膜および下地金属内に生じる応力状態を解析した結果を示し考察を行う。

3. 1 解析条件

本研究の解析条件を表3.1に示す。球および下地金属は工業上利用頻度の高い機械材料である鋼材（ヤング率 206GPa、ポアソン比は 0.3）とする。本研究では第1章で述べた成膜方法により成膜された、現有する幅広い多種のコーティング膜を研究対象とするために、厚さ 25.0[μm]～100.0[μm]のコーティング膜を想定し解析を行う。また非常にやわらかい材料から非常に硬い材料まで多種多様な材料がコーティング膜に使用された場合に対し幅広く考察を行うために、コーティング膜のヤング率 E_c は、下地金属のヤング率の 0.25 倍～2.00 倍 ($E_c=51.5[\text{GPa}] \sim 412.0[\text{GPa}]$) の値を使用し解析を行う。

3. 2 ヘルツ接触圧力およびヘルツ接触半幅

本章で考察を行う無次元油膜圧力 P は油膜圧力 p を最大ヘルツ接触圧力 p_h で除して無次元化した値であり、無次元油膜厚さ H は油膜厚さ h をヘルツ接触半幅 a を用いて無次元化した値である。また応力についても、各応力値を最大ヘルツ接触圧力 p_h で除して無次元化した値を用いて考察を行っている。そこで図3.1に、無潤滑下で球をコーティング膜表面に押し付けた際のコーティング膜の厚さ T_c と最大ヘルツ接触圧力 p_h の関係、また図3.2にコーティング膜の厚さ T_c とヘルツ接触半幅 a の関係を示す。

同一 T_c で比較すると E_c/E_s がより大きいほど p_h はより大きく、 a はより小さい。この結果は、 T_c が一定の場合、 E_c/E_s がより大きくなると、コーティング膜表面の変形がより小さくなるので、接触領域は小さくなり、 a は小さくなると考える。一方、接触領域がより小さくなると接触領域内に生じる接触圧力は全体的に大きくなる。その結果、 E_c/E_s がより大きくなると接触圧力の最大値である p_h はより大きくなると考える。

また、同一 E_c/E_s で比較すると、 E_c/E_s 値が 1.0 以下の場合には T_c がより大きくなるとコーティング膜表面の変形がより大きくなるので p_h はより小さく a はより大きくなる。一方、 E_c/E_s 値が 1.0 以上の場合には T_c がより大きくなるとコーティング膜表面の変形がより小さくなるので p_h はより大きく a はより小さくなる。

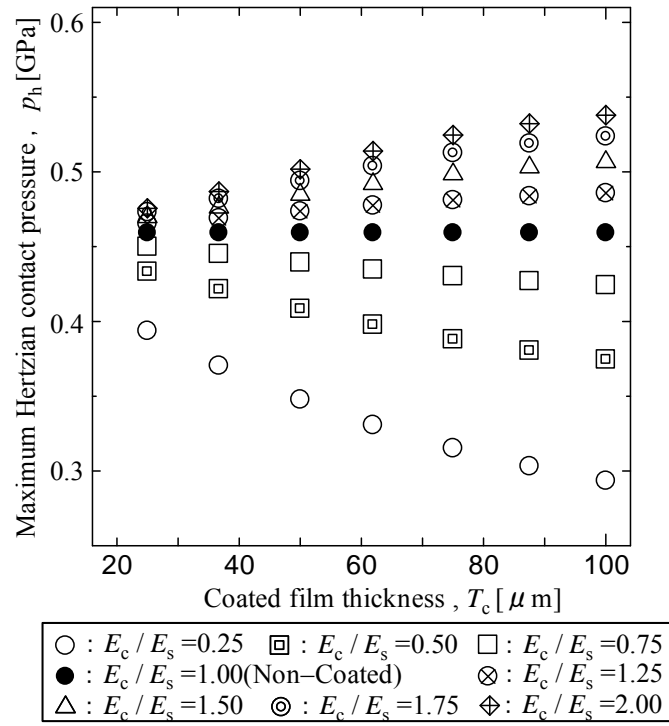


図 3.1 コーティング膜の厚さ T_c と最大ヘルツ接触圧力 p_h の関係

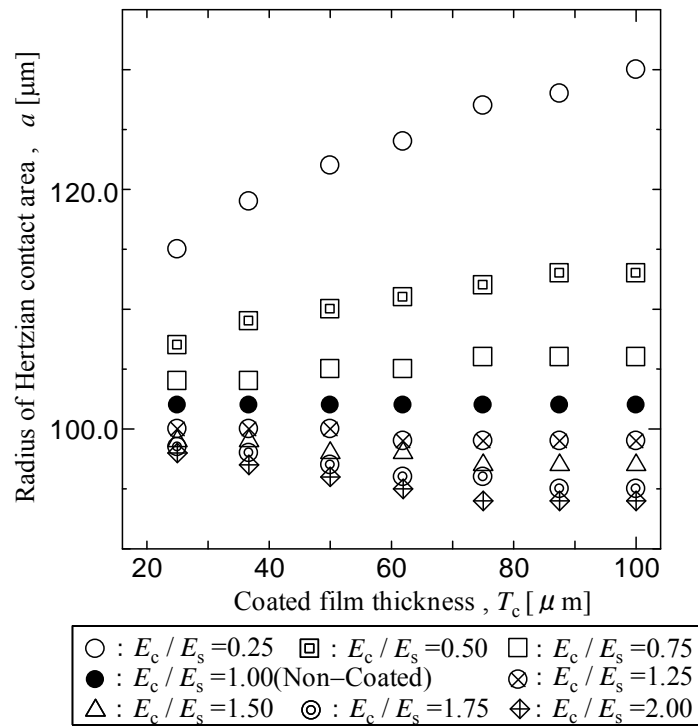


図 3.2 コーティング膜の厚さ T_c とヘルツ接触半幅 a の関係

表 3.1 解析条件

無次元荷重パラメータ, W	1.73×10^{-7}
無次元速度パラメータ, U	8.83×10^{-12}
無次元材料パラメータ, G	4980
球のヤング率, E_b [GPa]	206
球のポアソン比, κ_b	0.3
コーティング膜のヤング率, E_c [GPa]	$E_c=51.5 \sim 412.0$ ($E_c/E_s=0.25 \sim 2.00$)
コーティング膜のポアソン比, κ_c	0.3
下地金属のヤング率, E_s [GPa]	206
下地金属のポアソン比, κ_s	0.3
コーティング膜の厚さ, T_c [μm]	$T_c=25.0 \sim 100.0$

3. 3 油膜圧力および油膜厚さ

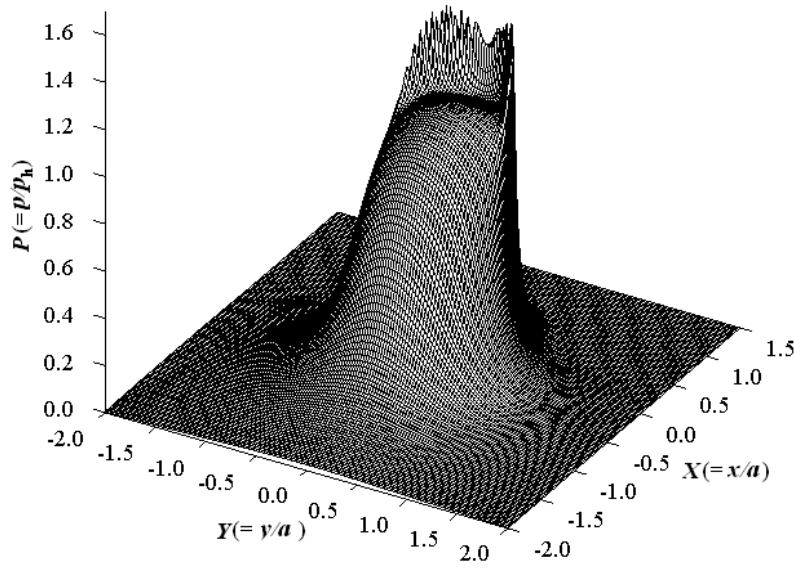
本節では、無次元油膜圧力 P および無次元油膜厚さ H の解析結果を中心に述べ考察を行う。油膜圧力および油膜厚さを解析した結果をまとめると以下ようになる。

- (1) コーティング膜の厚さが一定の場合、コーティング膜のヤング率がより大きくなると、油膜圧力の高い領域が x 方向、 y 方向ともに接触中心へ集中してくるので、その結果、無次元最大油膜圧力は大きくなる。
- (2) コーティング膜の厚さが一定の場合、コーティング膜のヤング率がより大きくなると、油膜の平行部は狭くなり、油膜のくびれが生じる位置は接触中心へ移動する。また無次元最小油膜厚さはより大きくなる。
- (3) コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合、コーティング膜の厚さがより大きくなると、有次元最大油膜圧力はより大きく、有次元最小油膜厚さはより小さくなる。一方、コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合には、コーティング膜の厚さがより大きくなると有次元最大油膜圧力はより小さく、有次元最小油膜厚さはより大きくなる。

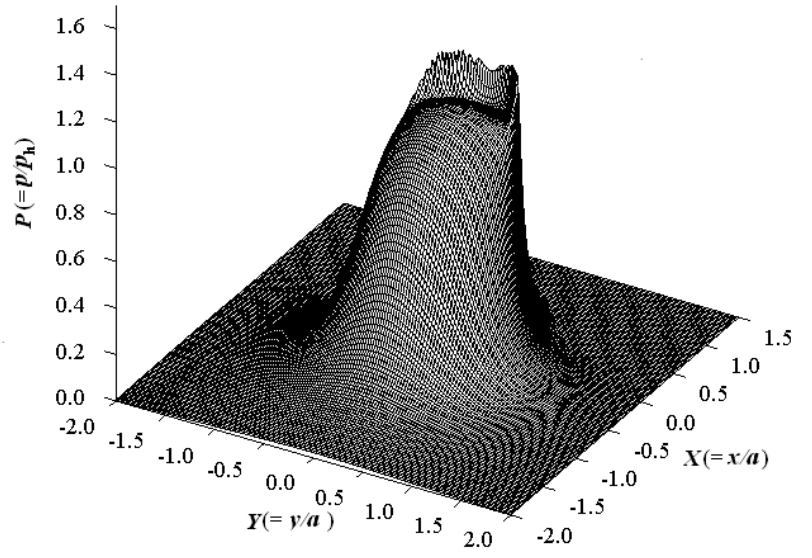
以下にその詳細について述べるとともに考察を行う。

3. 3. 1 コーティング膜と下地金属のヤング率比の影響

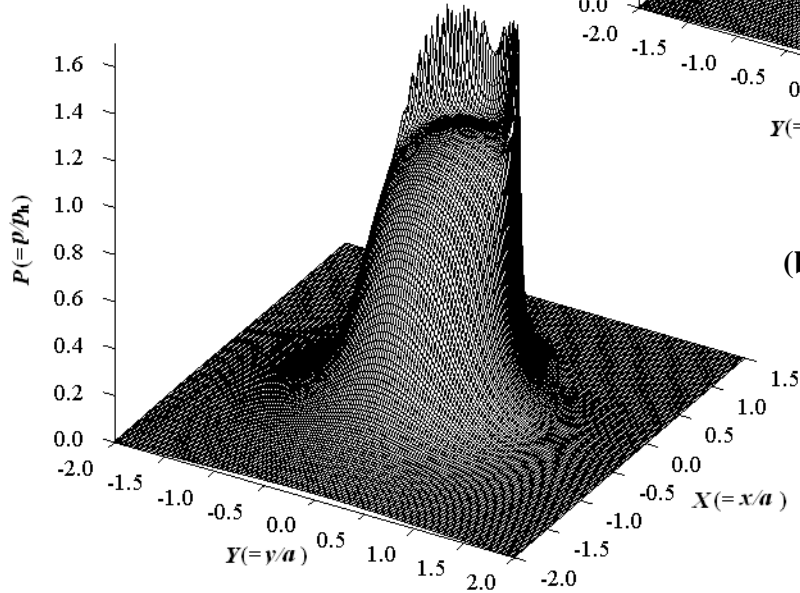
図 3.3(a)～(c)に、無次元油膜圧力 P の分布、図 3.4(a)～(c)に、無次元油膜厚さ H の分布を示す。コーティング膜の有無に関わらず無次元油膜圧力は、弾性流体潤滑特有の接触域出口付近に圧力スパイクと呼ばれる突出した部分が生じ、接触中心からみて Y 方向両サイドに対称の分布となる。無次元油膜厚さは接触域出口付近と接触中心からみて Y 方向両サイドに油膜のくびれが形成され、油膜厚さが最小となる。図 3.3(b)および図 3.4(b)より、コーティング膜の厚さ $T_c=100.0$ [μm]、コーティング膜材のヤング率 E_c と下地金属材のヤング率 E_s の比 E_c/E_s が 0.50 の場合には、コーティング膜が施されていない図 3.3(a)および図 3.4(a)と比較して、圧力スパイクが小さく、無次元最大油膜圧力 P_{\max} および無次元最小油膜厚さ H_{\min} は小さくなるのに対して、図 3.3(c)および図 3.4(c)において、 $E_c/E_s=2.00$ の場合には、圧力スパイクが大きく、 P_{\max} および H_{\min} は大きくなる。この場合、圧力スパイクの最大圧力値が P_{\max} となる。図 3.5 および図 3.6 は、接触中心を通る x 軸上および y 軸上の油膜圧力分布、図 3.7 および図 3.8 は、接触中心を通る x 軸上および y 軸上の油膜厚さ分布を示す。 T_c が一定の場合、 E_c/E_s の増加に伴ってコーティング膜表面の変形が小さくなるために油膜圧力の高い領域が x 方向および y 方向ともに接触中心に集中してくるので、その結果、接触中心付近の油膜圧力は大きくなる。油膜厚さは E_c/E_s の増加に伴って、油膜の平行部が x 方向および y 方向ともに狭くなり、油膜のくびれは接触中心方向へ移動する。



(a) Without the coated film

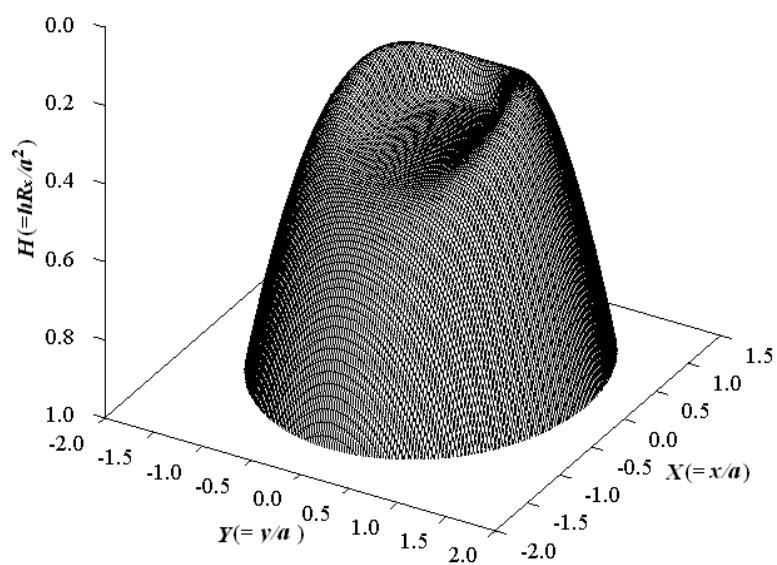


(b) $T_c = 100.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s = 0.50$

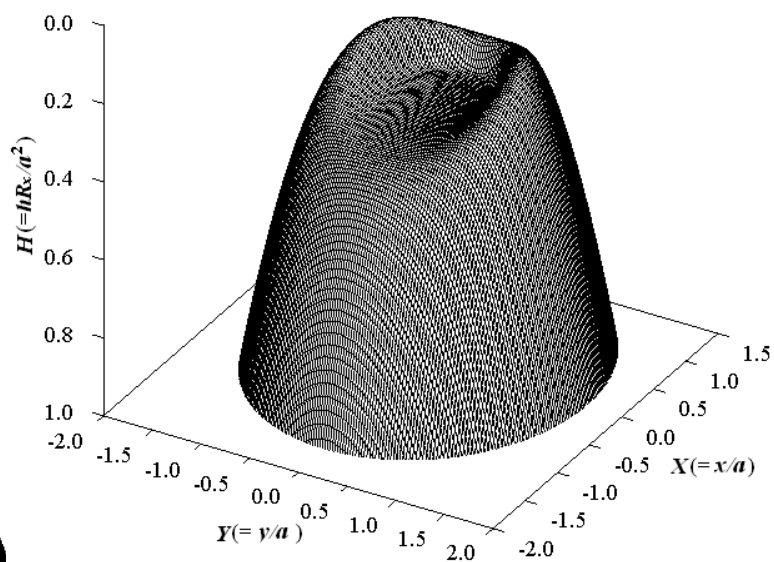


(c) $T_c = 100.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s = 2.00$

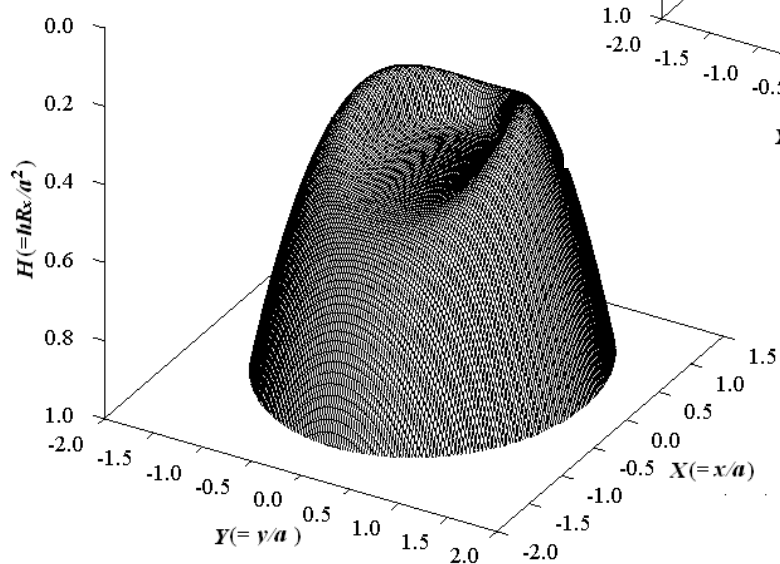
図 3.3 無次元油膜圧力 P の分布



(a) Without the coated film



(b) $T_c = 100.0 [\mu\text{m}]$, $E_c/E_s = 0.50$



(c) $T_c = 100.0 [\mu\text{m}]$, $E_c/E_s = 2.00$

図 3.4 無次元油膜厚さ H の分布

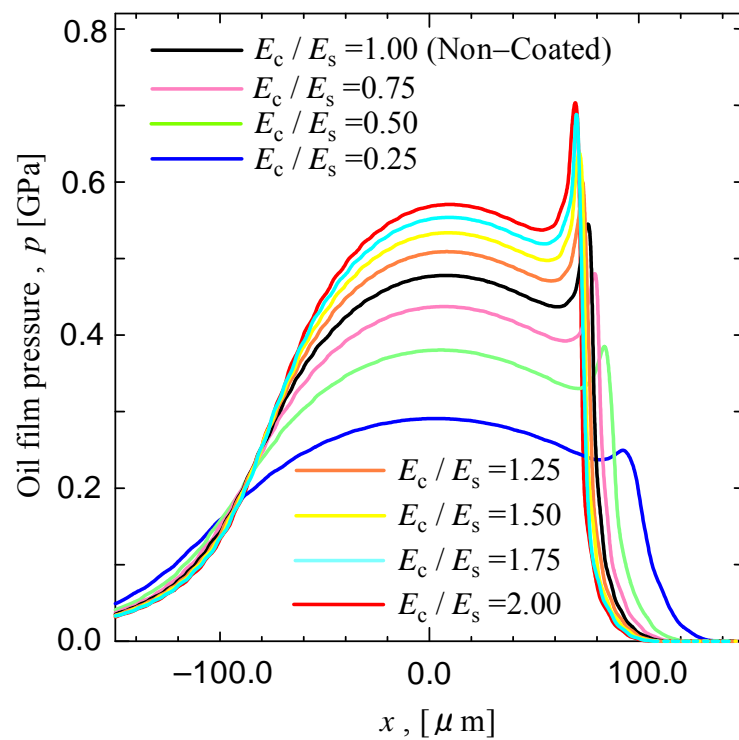


図 3.5 x 軸上の油膜圧力 p の分布 ($T_c=100.0\mu\text{m}$)

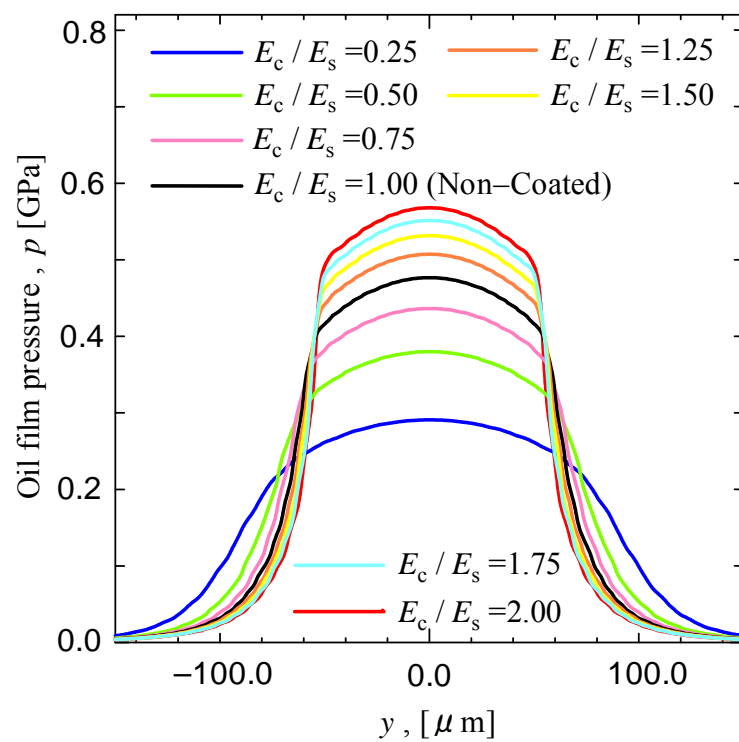


図 3.6 y 軸上の油膜圧力 p の分布 ($T_c=100.0\mu\text{m}$)

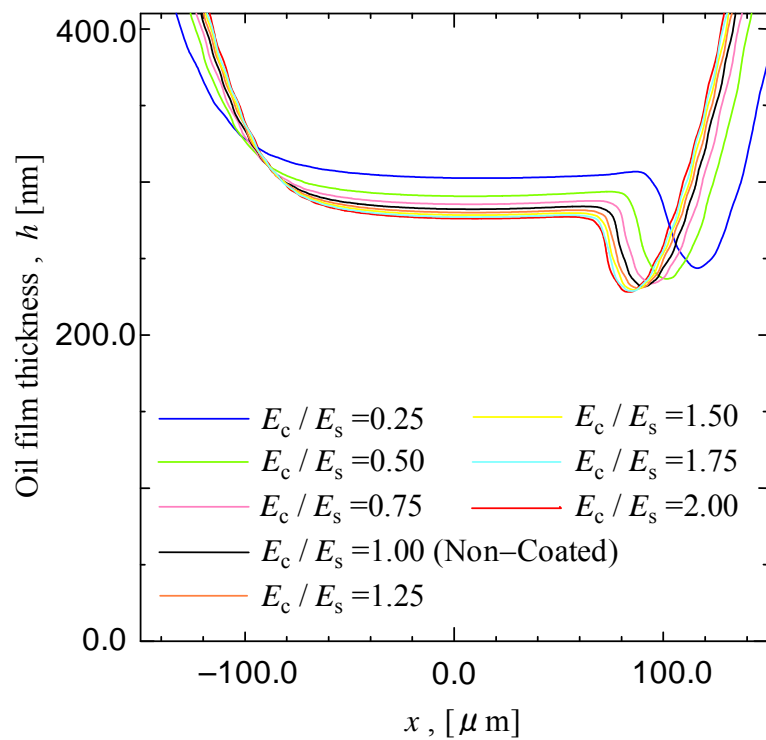


図 3.7 x 軸上の油膜厚さ h の分布 ($T_c=100.0\mu\text{m}$)

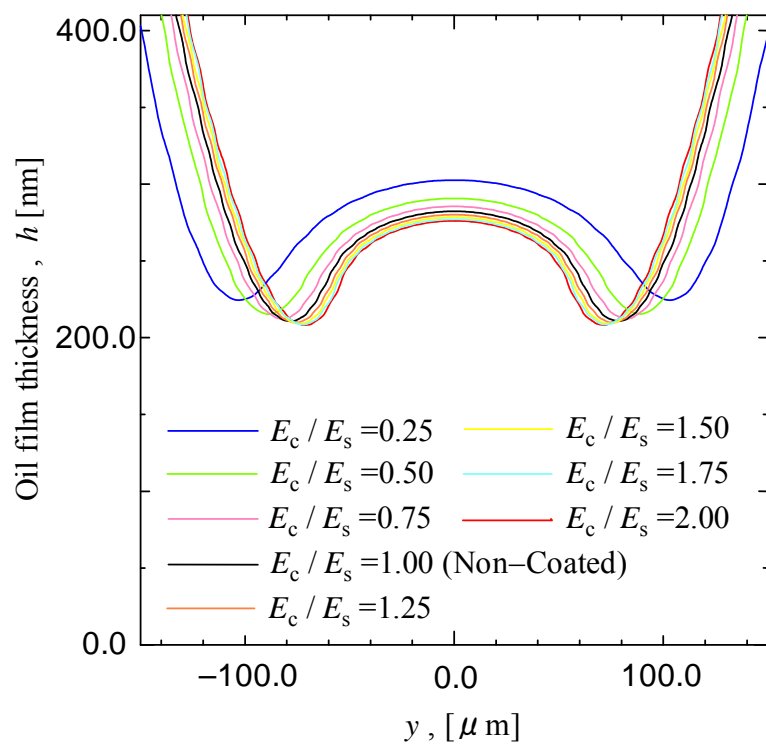


図 3.8 y 軸上の油膜厚さ h の分布 ($T_c=100.0\mu\text{m}$)

付表 3.1(a)～付表 3.7(a)は、ヘルツ接触半幅 a 、最大ヘルツ接触圧力 p_h 、無次元最大油膜圧力 P_{\max} とその発生位置を示す。付表 3.1(a)～付表 3.7(a)中の X , Y はそれぞれ、 P_{\max} が生じている位置の x , y 座標を無次元表示したものである。付表 3.1(b)～付表 3.7(b)は、無次元最小油膜厚さ H_{\min} とその発生位置を示す。付表 3.1(b)～付表 3.7(b)中の X , Y はそれぞれ、 H_{\min} が生じている位置の x , y 座標を無次元表示したものである。なお x , y 座標の原点は接触中心であり、 x 座標および y 座標は図 2.1(a)に示す方向をそれぞれ正とする。

T_c の値に関わらず、 $E_c/E_s=0.25$ の場合、 P_{\max} は接触中心近傍で生じるのに対して、 $E_c/E_s=0.25$ 以外の場合には接触域出口付近で P_{\max} が生じる。これは、図 3.5 に示されるように、 E_c/E_s の増加に伴って圧力スパイクが大きくなり、その結果、圧力スパイクの最高圧力値が P_{\max} となることを意味する。また同一 T_c で比較をした場合、 E_c/E_s がより大きくなると、 H_{\min} の発生位置はより接触中心に近い位置に移動する。

図 3.9 に、コーティング膜の厚さ T_c と無次元最大油膜圧力 P_{\max} の関係、図 3.10 にコーティング膜の厚さ T_c と無次元最小油膜厚さ H_{\min} の関係を示す。

同一 T_c で比較すると E_c/E_s がより大きいほど P_{\max} はより大きくなる。この結果は、 T_c が一定の場合、 E_c/E_s がより大きくなると、コーティング膜表面の変形が小さくなり、その結果、油膜圧力の高い領域が x 方向および y 方向ともに接触中心に集中し、油膜圧力の高い領域が比較的狭くなるために生じると考える。また E_c/E_s がより大きくなると、 H_{\min} はより大きくなる。無次元油膜厚さ H は、(2.10)式に示されるように H_0 , V^b および V^c の値より得られる。上述したように同一 T_c の場合、 E_c/E_s がより大きくなるとコーティング膜表面の変位は小さくなり、油膜圧力が高い領域が x 方向および y 方向ともに接触中心に集中するために、接触中心における油膜厚さ H_0 の値がより大きくなる。従って、 E_c/E_s が大きくなるほど、 H_{\min} はより大きくなると考える。

3. 3. 2 コーティング膜の厚さの影響

同一 E_c/E_s で比較すると、 T_c の変化に伴う P_{\max} の変化は小さい。 P_{\max} は有次元最大油膜圧力 p_{\max} を最大ヘルツ接触圧力 p_h で除して無次元化した値である。従って、この結果は T_c の変化に伴う p_{\max} の変化量と p_h の変化量が同程度であることを意味している。一方、 E_c/E_s 値が 1.0 以上の場合には、 T_c がより大きいほど H_{\min} はより大きく、 E_c/E_s 値が 1.0 以下の場合には、 T_c がより大きいほど H_{\min} はより小さい。 H_{\min} は最小油膜厚さ h_{\min} をヘルツ接触半幅 a により無次元化した値である。従って、この結果は E_c/E_s 値が 1.0 以上の場合には、 T_c の変化に伴う h_{\min} の変化量がヘルツ接触半幅 a の変化量より大きく、 E_c/E_s 値が 1.0 以下の場合には、 h_{\min} の変化量がヘルツ接触半幅 a の変化量より小さいことを表している。

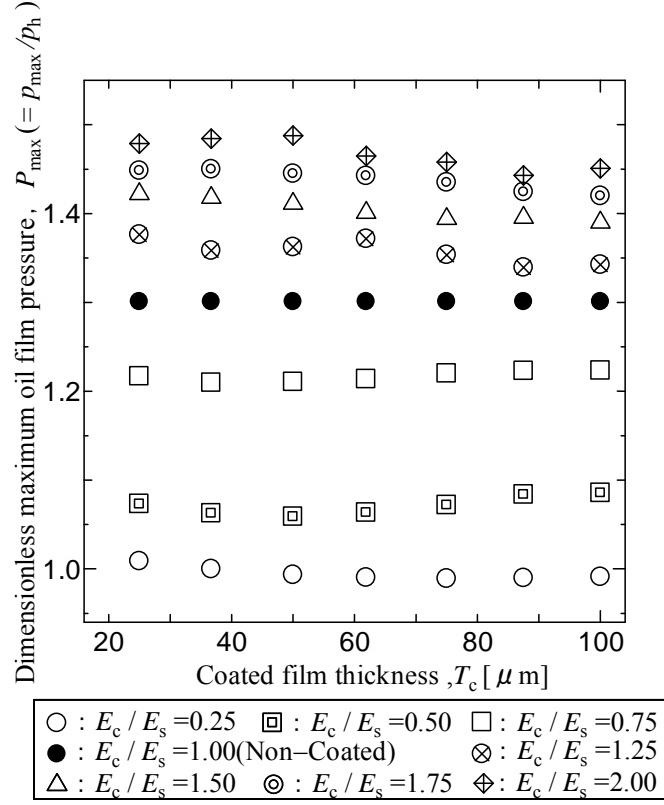


図 3.9 コーティング膜の厚さ T_c と無次元最大油膜圧力 P_{\max} の関係

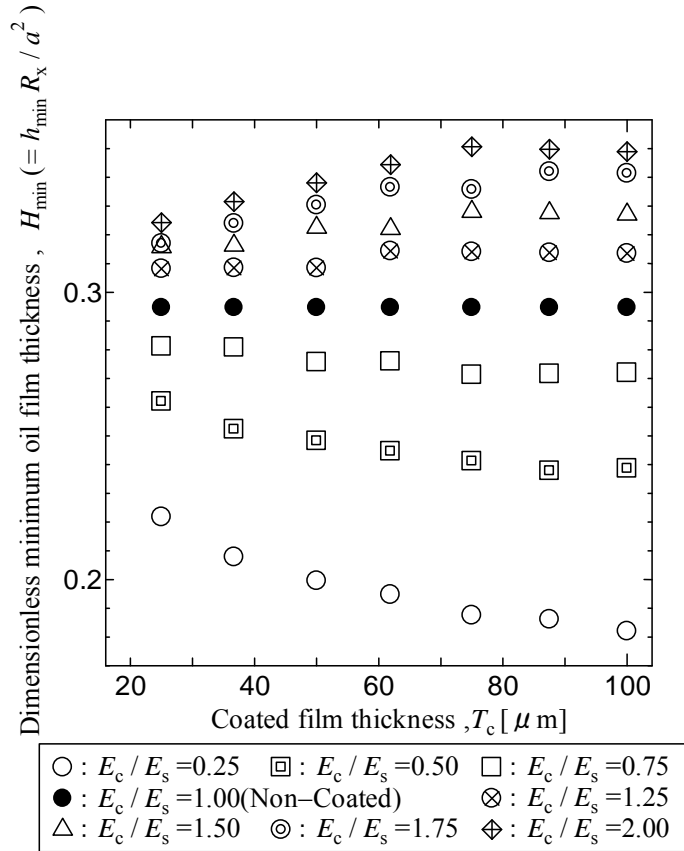


図 3.10 コーティング膜の厚さ T_c と無次元最小油膜厚さ H_{\min} の関係

次に、最大油膜圧力と最小油膜厚さを定量的に評価するために、図 3.11 に、コーティング膜の厚さ T_c と有次元最大油膜圧力 p_{\max} の関係、図 3.12 にコーティング膜の厚さ T_c と有次元最小油膜厚さ h_{\min} の関係を示す。

同一 E_c/E_s で比較すると、 E_c/E_s 値が 1.0 以下の場合には、 T_c がより大きいほど p_{\max} はより小さく、 h_{\min} はより大きくなる。この場合、 T_c がより大きいほど、コーティング膜表面の変形が大きくなるので、有次元油膜厚さは増加し、油膜圧力が高い領域が x 方向および y 方向ともに分散し、単位面積当たりに負荷される荷重が分担されるために p_{\max} はより小さく、 h_{\min} はより大きくなるを考える。一方、 E_c/E_s 値が 1.0 以上の場合には、 T_c がより大きいほど p_{\max} はより大きく、 h_{\min} はより小さくなる。 T_c がより大きいほど、コーティング膜表面の変形が小さくなるので有次元油膜厚さはより小さくなり、さらに負荷が狭い領域に集中しその結果、単位面積当たりに負荷される荷重が大きくなるために p_{\max} はより大きく、 h_{\min} はより小さくなるを考える。

このように、下地金属上に施すコーティング膜のヤング率および厚さが変化すると、油膜圧力分布および油膜厚さ分布が変わり、その結果、油膜圧力の最大値とその発生位置および油膜厚さの最小値とその発生位置は変化する。

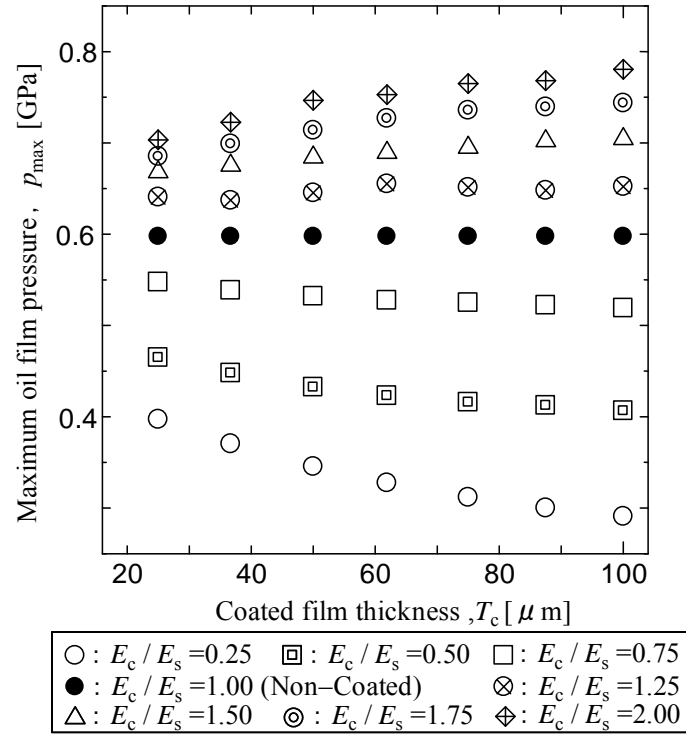


図 3.11 コーティング膜の厚さ T_c と有次元最大油膜圧力 p_{\max} の関係

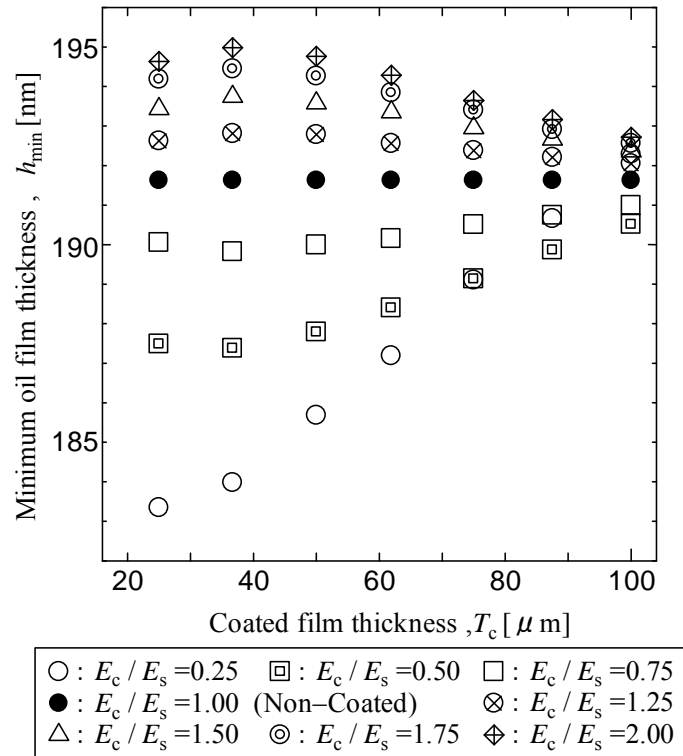


図 3.12 コーティング膜の厚さ T_c と有次元最小油膜厚さ h_{\min} の関係

3. 4 内部応力

付表 3.8～付表 3.14 は、垂直応力成分の最大値 $\sigma_{x-\max}$, $\sigma_{y-\max}$, $\sigma_{z-\max}$, せん断応力成分の最大値 $\tau_{xy-\max}$, $\tau_{yz-\max}$, $\tau_{zx-\max}$, 最大せん断応力の最大値 $\tau_{\max-\max}$ および von Mises 応力の最大値 $\sigma_{\text{mise-max}}$ を p_h でそれぞれ無次元化した値 $\sigma_{x-\max}/p_h$, $\sigma_{y-\max}/p_h$, $\sigma_{z-\max}/p_h$, $\tau_{xy-\max}/p_h$, $\tau_{yz-\max}/p_h$, $\tau_{zx-\max}/p_h$, $\tau_{\max-\max}/p_h$ および $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ とその発生位置についての解析結果を示す. 付表 3.8～付表 3.14 中の X , Y , Z はそれぞれ, 各応力の最大値が生じている位置の x , y , z 座標をそれぞれ無次元表示したものであり, Z_c はコーティング膜と下地金属の界面の Z 座標を無次元表示したものである. なお X , Y 座標の正方向は図 2.1(a)に示す通りであり, それぞれの原点は接触中心である. また Z 座標および Z_c 座標の原点は表面である. T_c および E_c/E_s の値に関わらず, どの計算条件においても $\sigma_{x-\max}/p_h$, $\sigma_{y-\max}/p_h$, $\sigma_{z-\max}/p_h$ と $\tau_{xy-\max}/p_h$ はコーティング膜表面で生じているのに対して, $\tau_{yz-\max}/p_h$, $\tau_{zx-\max}/p_h$, $\tau_{\max-\max}/p_h$ および $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はコーティング膜内もしくは下地金属内で生じ, その位置はコーティング膜材のヤング率および厚さにより変化する.

材料が破壊する原因については古くから研究されており, 様々な学説が発表されている. そのなかで本研究では, 「せん断ひずみエネルギーが降伏現象を支配するものとして, (2.39)式で定義される相当応力 (von Mises 応力: σ_{mises}) が材料の降伏応力に達したときに, 材料の破壊が生じる」という, ミーゼスの降伏条件^[3.1]を基に, コーティング膜および下地金属内で生じる応力を評価する. 従って, 本節では (2.39)式で定義される von Mises 応力 σ_{mise} の解析結果を中心に述べ考察を行う.

コーティング膜および下地金属内で生じる応力を解析した結果をまとめると以下のようなになる.

- (1) コーティング膜の厚さが一定の場合, コーティング膜のヤング率がより大きくなると, コーティング膜および下地金属の内部で生じる最大応力は大きくなる. すなわち, 下地金属のヤング率と比較して低いヤング率を持つコーティング膜材を用いることにより, 材料内部で生じる応力を小さく抑えることができる.
- (2) コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合, コーティング膜の厚さの増加に伴って, 材料内部で生じる von Mises 応力の最大値 $\sigma_{\text{mise-max}}$ は計算条件の範囲内で最大値を持つ. 一方, コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合には, コーティング膜の厚さの増加に伴って, 材料内部で生じる von Mises 応力の最大値は計算条件の範囲内で最小値を持つ.
- (3) コーティング膜のヤング率が一定の場合, コーティング膜の厚さが大きくなると, von Mises 応力の最大値が生じる位置は下地金属内からコーティング膜内へ移動する.

以下にその詳細について述べるとともに考察を行う。

3. 4. 1 コーティング膜と下地金属のヤング率比の影響

図 3.13～図 3.20 は、コーティング膜の厚さ T_c と無次元化された各応力の最大値の関係を示す。図 3.13～図 3.18 の縦軸は各応力の最大値を絶対値で表示している。本項では、図 3.13～図 3.20 において最大応力値に対するコーティング膜のヤング率 E_c と下地金属のヤング率 E_s の比 E_c/E_s の影響について考察を行う。

同一 T_c で比較すると E_c/E_s がより大きいほど、無次元化された垂直応力成分、せん断応力成分、最大せん断応力および von Mises 応力ともに最大応力値はより大きくなる傾向にある。すなわちコーティング膜がない場合 ($E_c/E_s=1.0$) と比較して E_c/E_s 値が 1.0 以上、すなわち下地金属のヤング率より高いヤング率を持つコーティング膜材を施すと、材料内部で生じる最大応力値はより大きく、下地金属のヤング率より低いヤング率を持つコーティング膜材を施すと、材料内部で生じる最大応力値はより小さくなる。 E_c/E_s がより大きくなると、上述したように油膜圧力の高い領域が x 方向および y 方向ともに接触中心に集中し P_{\max} がより大きくなり、その結果、コーティング膜表面に加わる負荷が集中し最大応力値はより大きくなると考える。

3. 4. 2 コーティング膜の厚さの影響

本項では、図 3.13～図 3.20 において最大応力値に対するコーティング膜の厚さ T_c の影響について考察を行う。

同一 E_c/E_s で比較すると、図 3.9 に示されるように T_c の変化に伴う P_{\max} の変化は小さいので、その影響を受けて各応力の最大値の変化も小さい。しかしながら、 E_c/E_s 値が 1.0 以下の場合には、 $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ 近傍で $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は計算された条件の範囲内で最小値を持つ。一方、 E_c/E_s 値が 1.0 以上の場合には、 T_c の増加に伴って $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ 近傍で計算された条件の範囲内で最大値を持つ。これは T_c が変化すると、コーティング膜および下地金属の内部で生じる応力の分布が変化し、 E_c/E_s および T_c によって応力が集中もしくは分散するために生じると考える。以下にその応力分布の詳細について述べる。

図 3.21(a), (b)は、コーティング膜が施されていない場合の X - Z 断面および Y - Z 断面上の $\sigma_{\text{mises}}/p_h$ の分布を示す。同図において、横軸 X 方向は潤滑油の流れる方向、 Y 方向は X 方向と垂直な方向、縦軸 Z 方向は、コーティング膜および下地金属の深さ方向をそれぞれ示し、 X 座標、 Y 座標および Z 座標はそれぞれヘルツ接触半幅 a で無次元化されている。 $Z=0.0$ は潤滑面を示し、 $X=0.0$ および $Y=0.0$ は接触中心を示す。また図中の×印は $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ が生じている位置を示す。コーティング膜が施

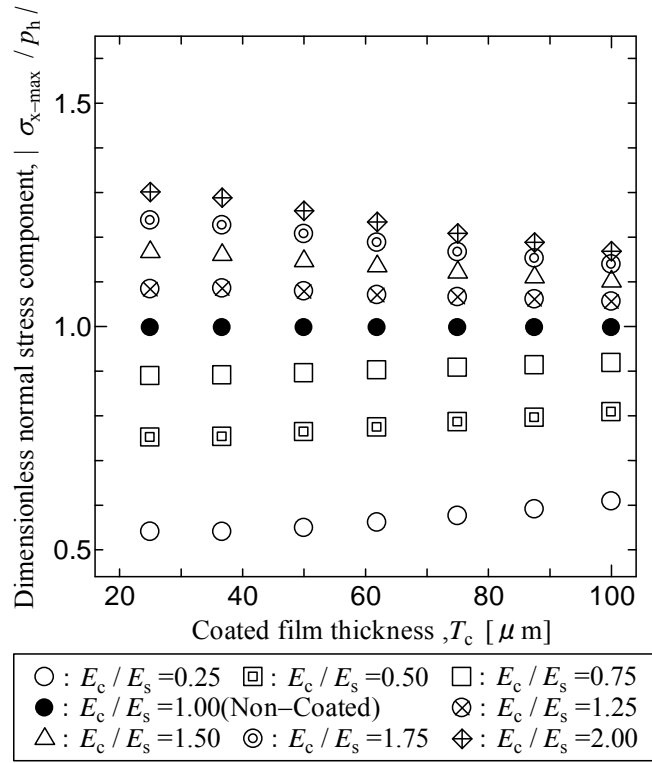


図 3.13 T_c と $\sigma_{x-\max}/p_h$ の関係

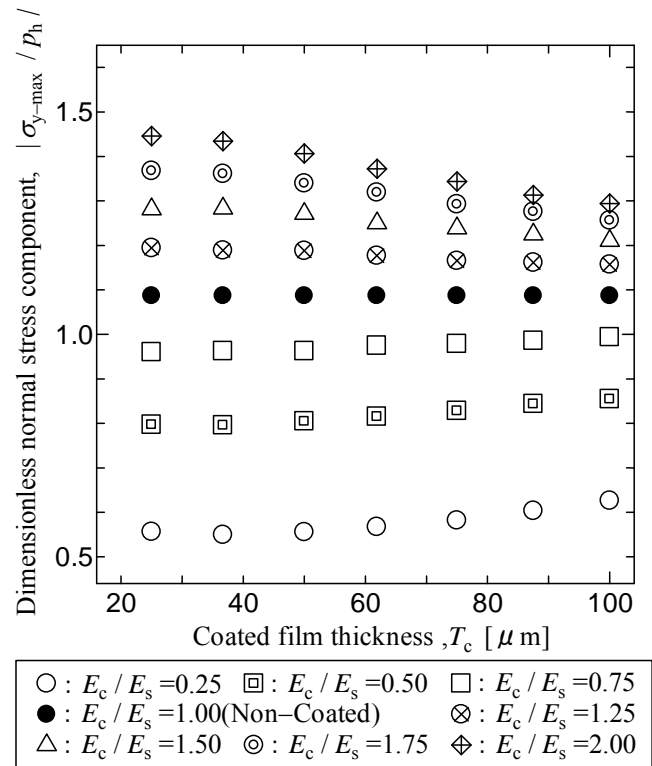


図 3.14 T_c と $\sigma_{y-\max}/p_h$ の関係

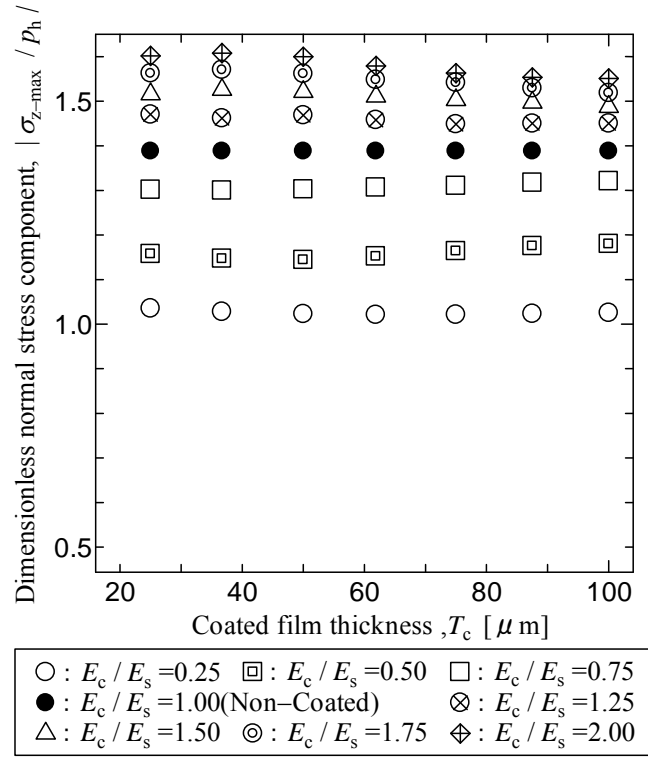


図 3.15 T_c と $\sigma_{z-\max}/p_h$ の関係

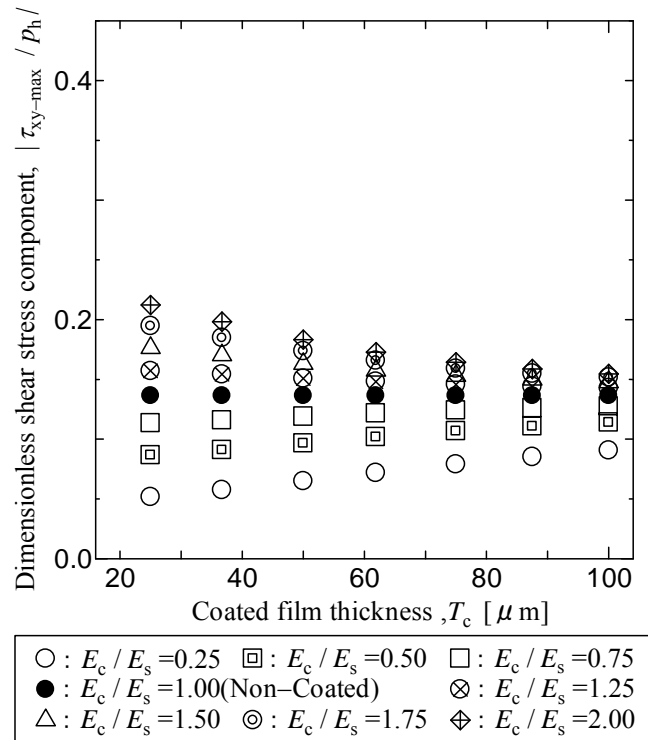


図 3.16 T_c と $\tau_{xy-\max}/p_h$ の関係

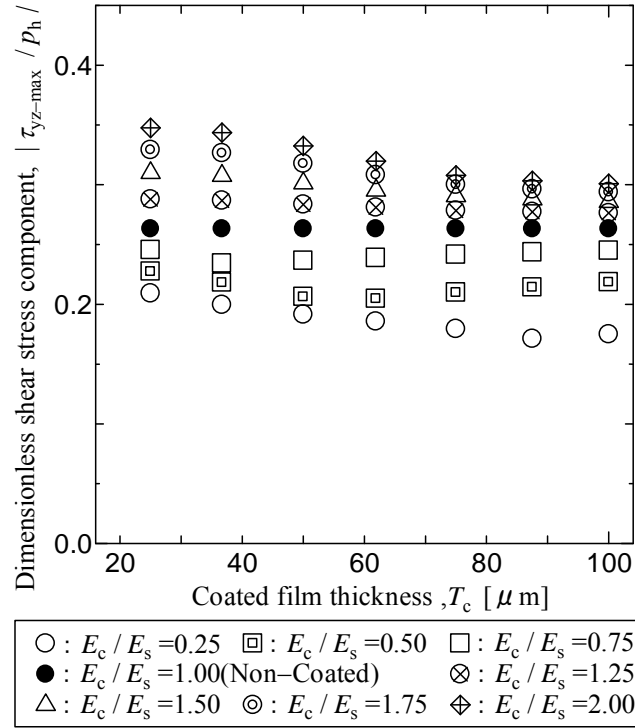


図 3.17 T_c と $\tau_{yz-\max}/p_h$ の関係

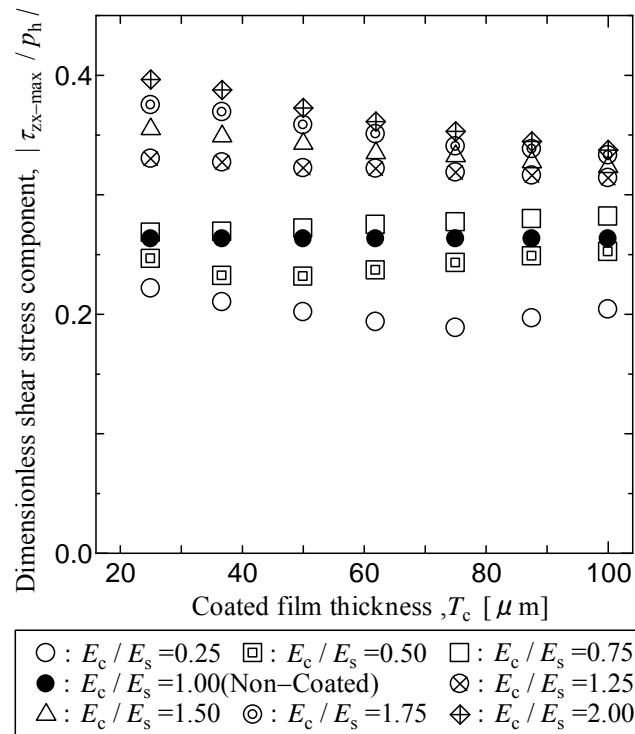


図 3.18 T_c と $\tau_{zx-\max}/p_h$ の関係

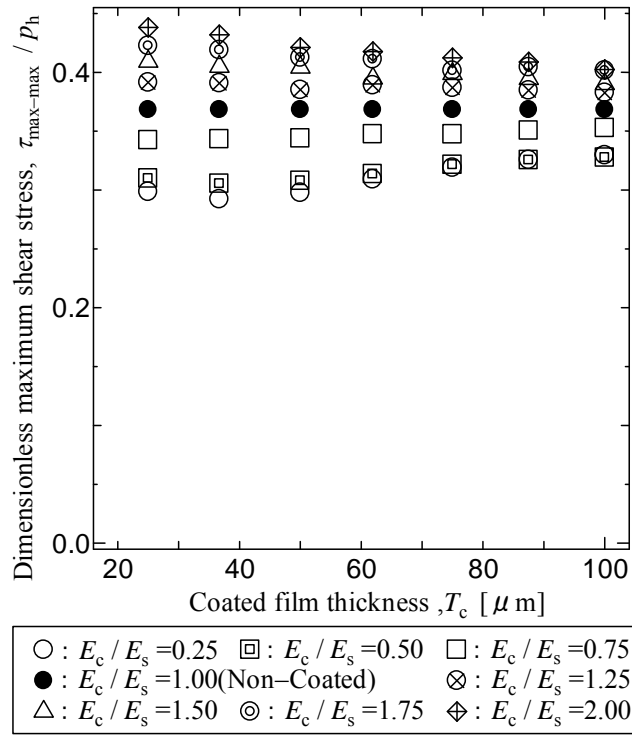


図 3.19 T_c と $\tau_{\max-\max}/p_h$ の関係

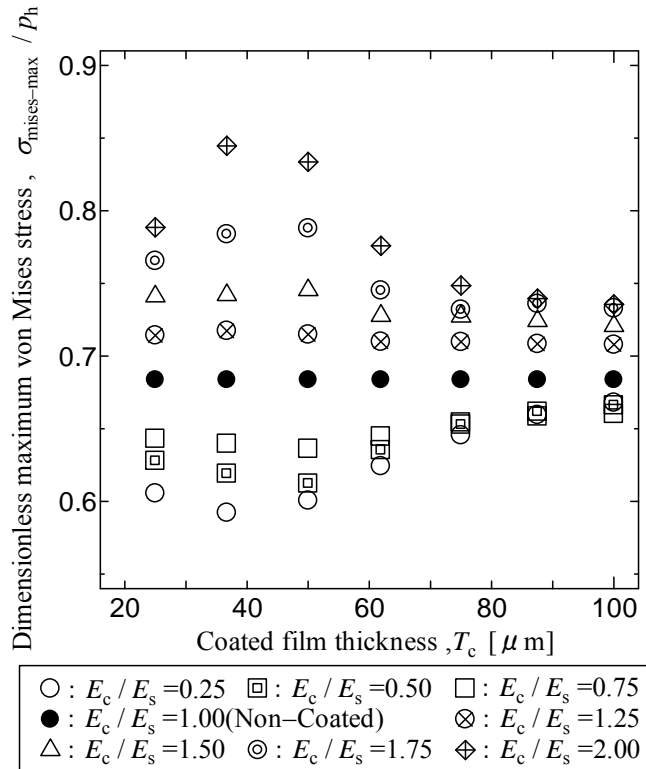
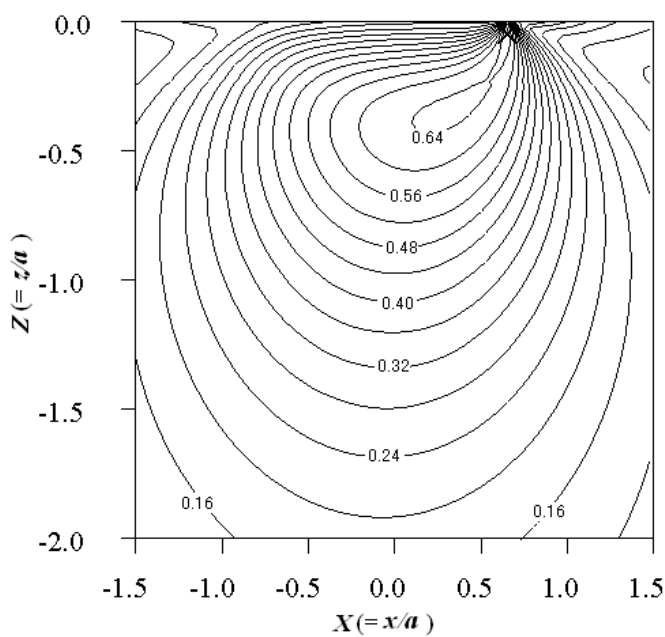


図 3.20 T_c と $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ の関係

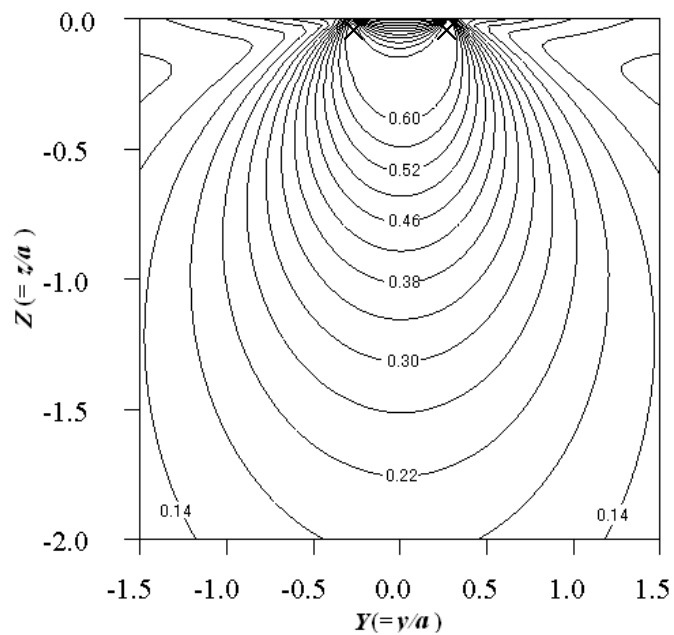
されていない場合には、比較的応力が高い領域は表面近傍に集中し、最大応力 $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ が生じる。

次にコーティング膜および下地金属内で生じる応力が高い $E_c/E_s=2.00$ の場合について、図 3.22(a), (b)～図 3.24(a), (b)に $T_c=25.0[\mu\text{m}]$, $50.0[\mu\text{m}]$, $100.0[\mu\text{m}]$ の場合における、 X - Z 断面および Y - Z 断面上の $\sigma_{\text{mises}}/p_h$ の分布を示す。 $T_c=25.0[\mu\text{m}]$ および $T_c=100.0[\mu\text{m}]$ の場合には、応力が比較的高い領域は圧力スパイクの最大値が生じている位置の直下、表面近傍の Y 方向両サイドの 2 箇所それぞれ分散するのに対して、 $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ の場合には、応力が高い領域がコーティング膜と下地金属との界面付近に集中する。従って、コーティング膜の厚さが変化することにより応力分布が変化し、 $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ 近傍でコーティング膜と下地金属との界面付近に応力が集中するために $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ 値は最大値をもつと考える。

さらにコーティング膜および下地金属内で生じる応力が低い $E_c/E_s=0.25$ の場合について、図 3.25(a), (b)～図 3.27(a), (b)に $T_c=25.0[\mu\text{m}]$, $50.0[\mu\text{m}]$, $100.0[\mu\text{m}]$ の場合における、 X - Z 断面および Y - Z 断面上の $\sigma_{\text{mises}}/p_h$ の分布を示す。 $T_c=25.0[\mu\text{m}]$ の場合には、比較的応力が高い領域は下地金属内に集中しているのに対して、 $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ の場合には、応力の高い領域はコーティング膜内と下地金属内に分散する。さらに $T_c=100.0[\mu\text{m}]$ の場合には応力の高い領域はコーティング膜内に集中する。従って、 $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ 近傍でコーティング膜内と下地金属内の双方に応力が分散するために $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ 値は最小値をもつと考える。さらに最大応力値が生じる位置に着目すると、 $T_c=25.0[\mu\text{m}]$ の場合には下地金属内で最大応力値をとるのに対して、 $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ および $T_c=100.0[\mu\text{m}]$ の場合には、コーティング膜内で最大応力値をとる。このように、 T_c が大きくなるにつれてコーティング膜内および下地金属内で生じる応力の分布が変化し、下地金属の内部で最大応力が生じていたものが、コーティング膜の内部で生じる。この傾向は、付表 3.8(c)～付表 3.14(c)中にあるコーティング膜と中間層の界面の Z 座標を無次元表示した Z_c と $\sigma_{\text{mises-max}}$ が生じる位置の Z 座標を比較するとわかり $E_c/E_s=0.50$ および 0.75 の場合においても同様の傾向となる。これは T_c が大きくなると、コーティング膜の性質が下地金属の性質に対して支配的になるためと考える。

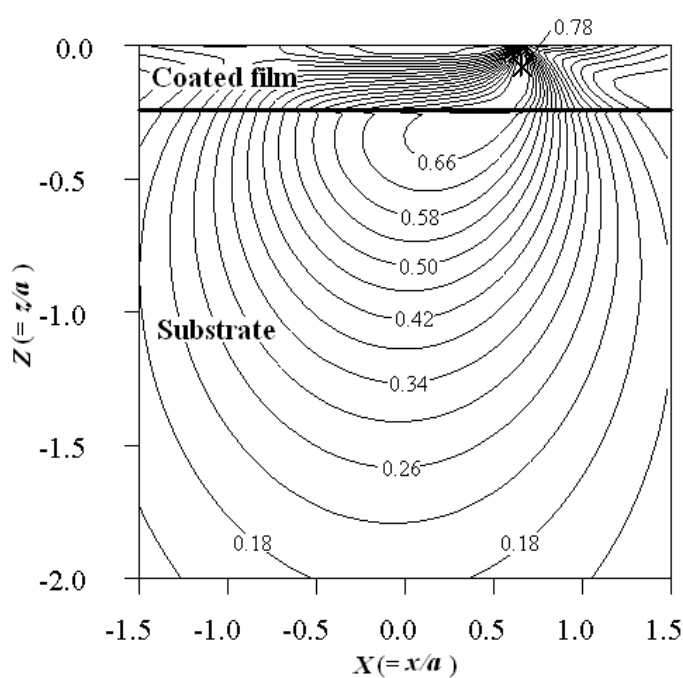


(a) X-Z 平面の分布図

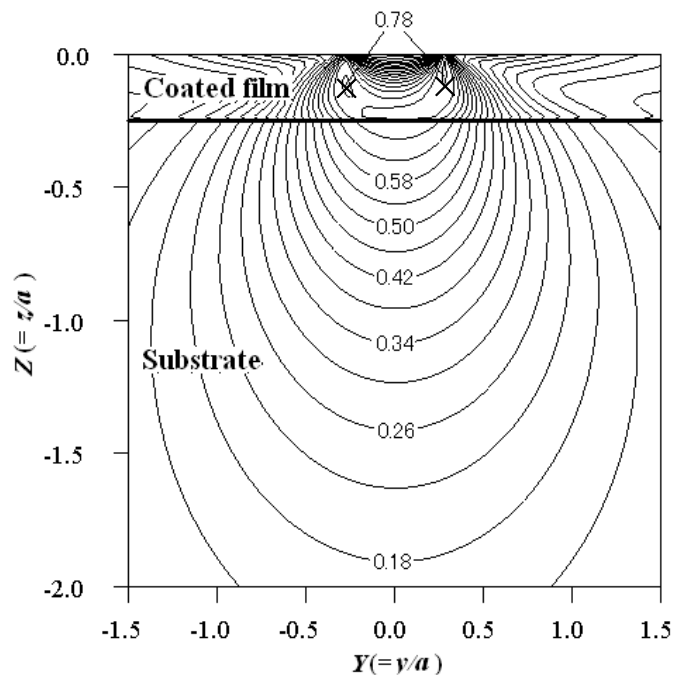


(b) Y-Z 平面の分布図

図 3.21 σ_{mise}/p_h の分布 : コーティング膜なし

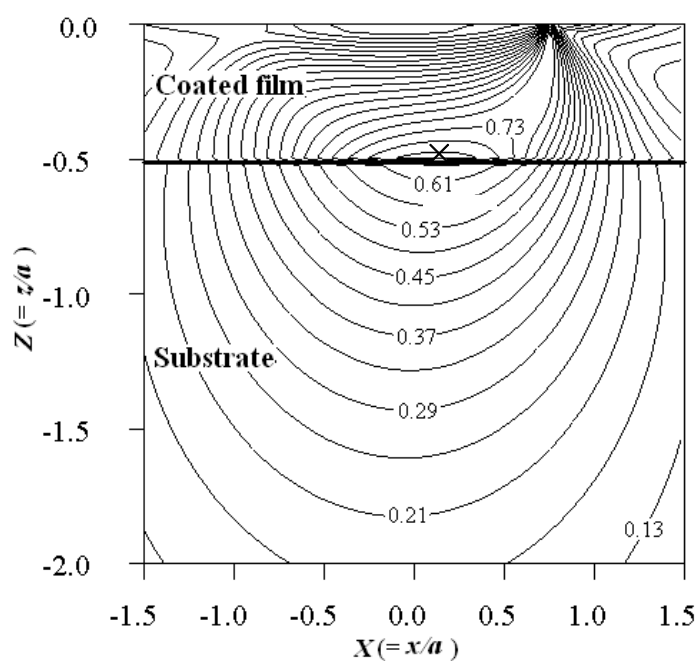


(a) X-Z 平面の分布図

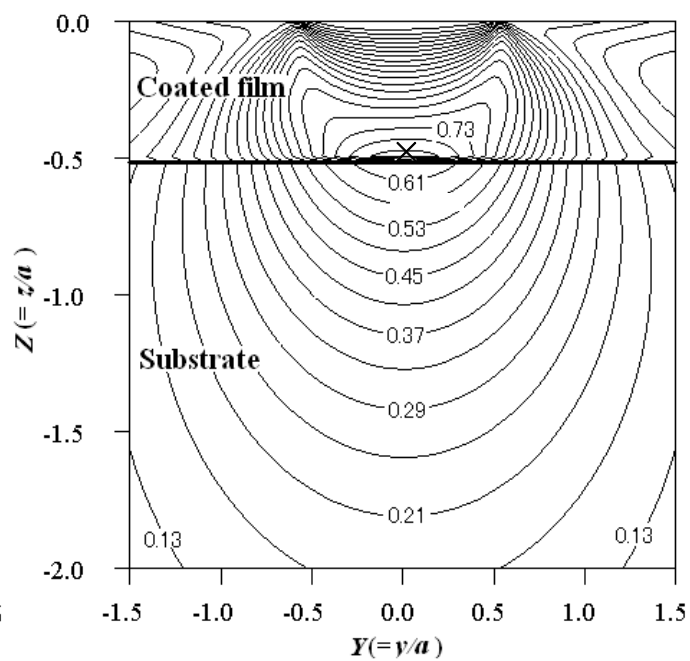


(b) Y-Z 平面の分布図

図 3.22 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=25.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=2.00$

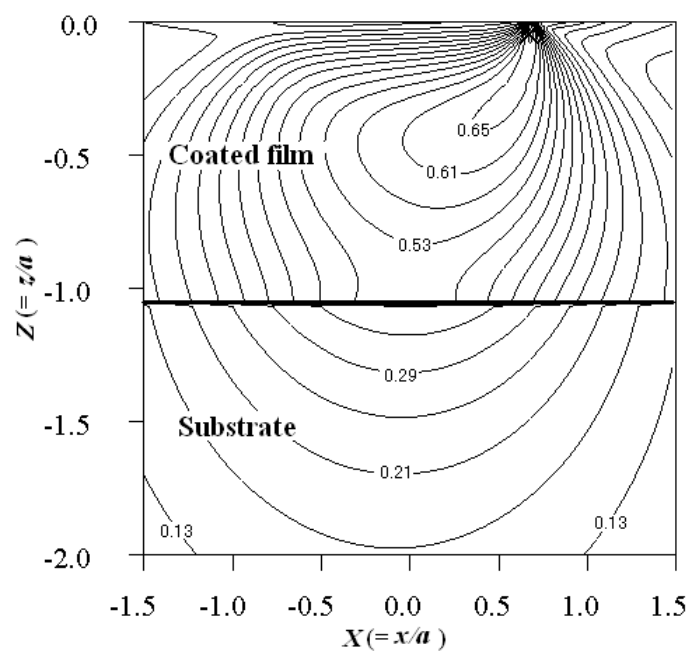


(a) X-Z 平面の分布図

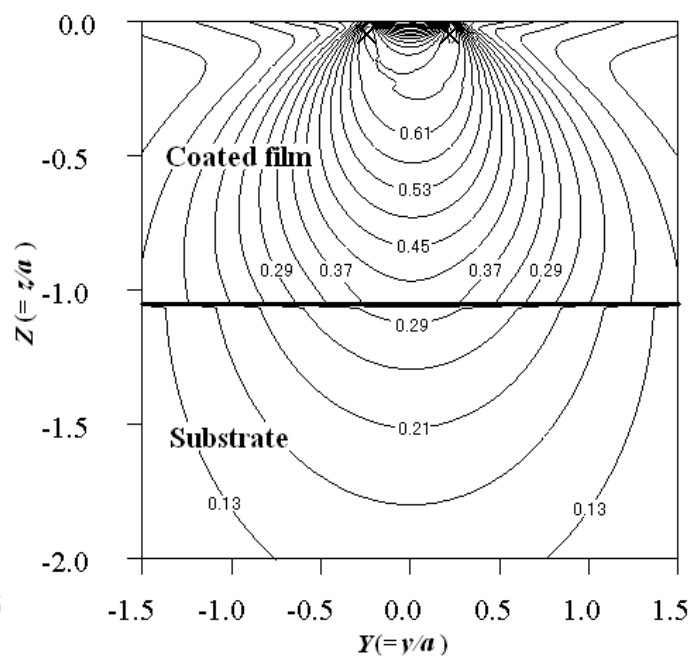


(b) Y-Z 平面の分布図

図 3.23 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=2.00$

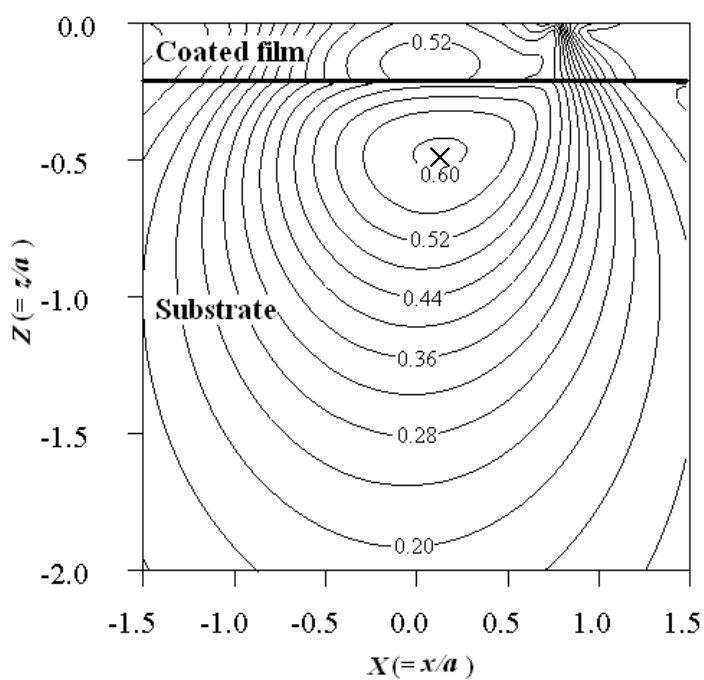


(a) X-Z 平面の分布図

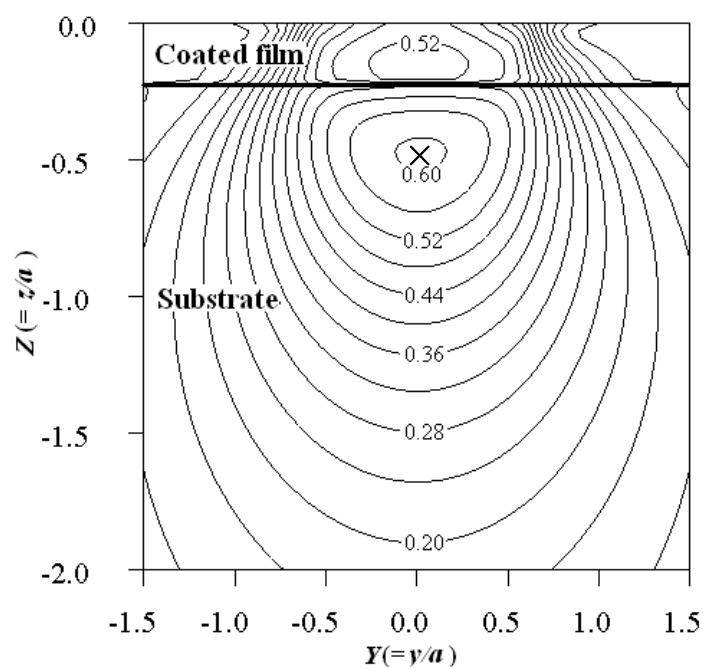


(b) Y-Z 平面の分布図

図 3.24 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=100.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=2.00$

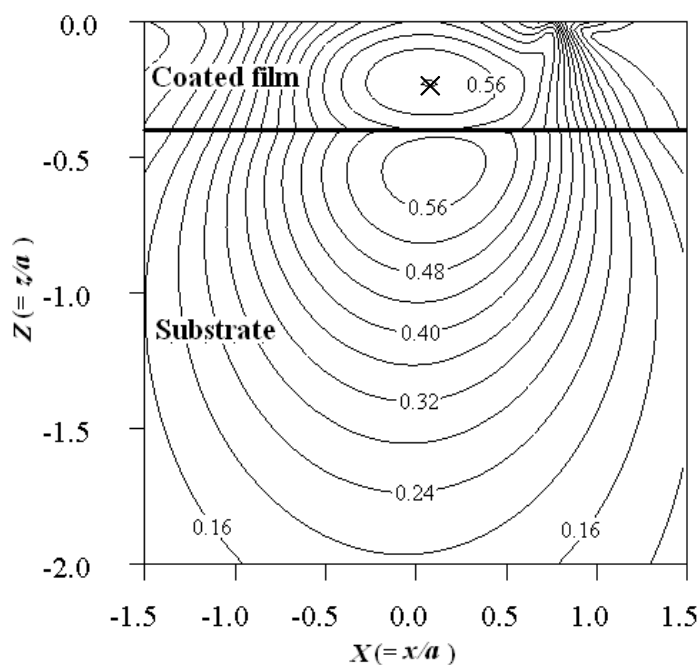


(a) X-Z 平面の分布図

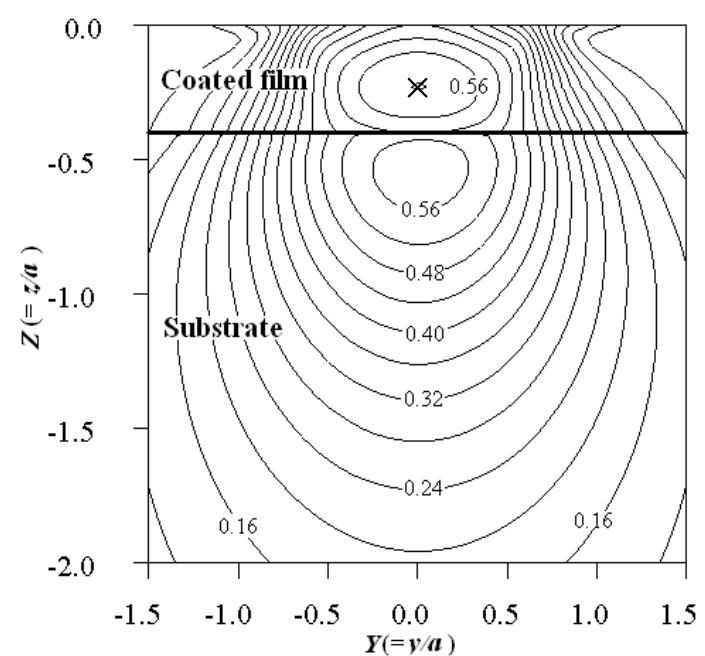


(b) Y-Z 平面の分布図

図 3.25 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c = 25.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s = 0.25$

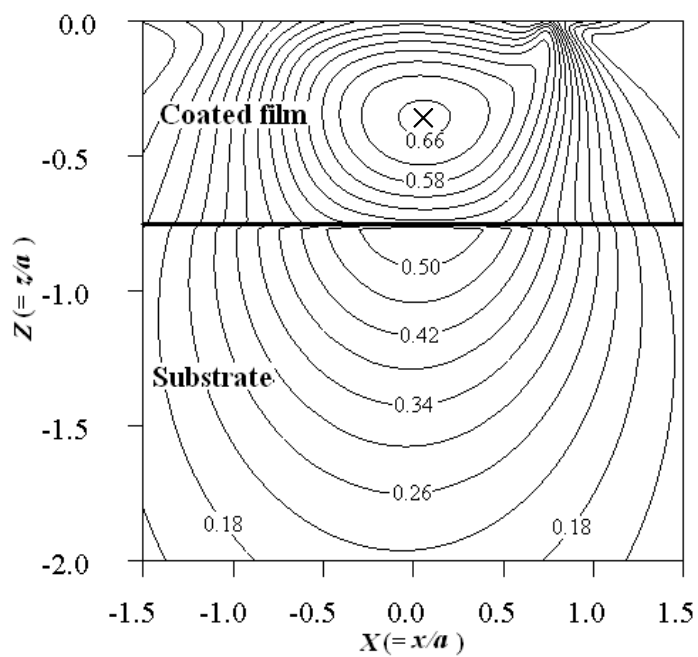


(a) X-Z 平面の分布図

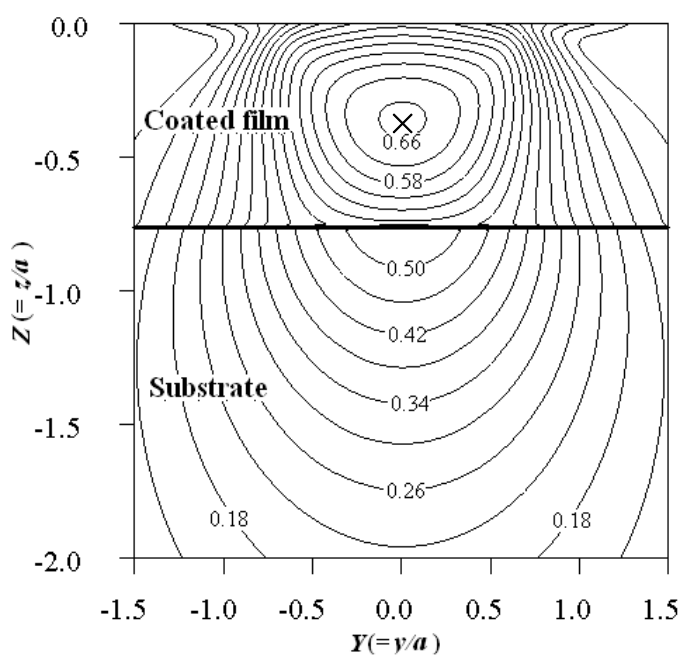


(b) Y-Z 平面の分布図

図 3.26 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c = 50.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s = 0.25$



(a) X - Z 平面の分布図



(b) Y - Z 平面の分布図

図 3.27 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=100.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.25$

3. 5 小結

弾性流体潤滑下で点接触している際に使用されるコーティング膜に対して、油膜圧力および油膜厚さを二次元解析するとともに、コーティング膜および下地金属内で生じる応力状態を三次元解析し考察を行った。本章で得られた結果および考察をまとめると以下のようになる。

- (1) コーティング膜の厚さが一定の場合、コーティング膜のヤング率がより大きくなると、油膜圧力の高い領域が x 方向、 y 方向ともに接触中心へ集中してくるので、その結果、無次元最大油膜圧力は大きくなる。
- (2) コーティング膜の厚さが一定の場合、コーティング膜のヤング率がより大きくなると、油膜の平行部は狭くなり、油膜のくびれが生じる位置は接触中心へ移動する。また無次元最小油膜厚さはより大きくなる。
- (3) コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合、コーティング膜の厚さがより大きくなると、コーティング膜表面の変形が小さくなるので有次元油膜厚さはより小さくなり、さらに負荷が狭い領域に集中しその結果、単位面積あたりに負荷される荷重が大きくなるために有次元最大油膜圧力はより大きく、有次元最小油膜厚さはより小さくなる。一方、コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合には、コーティング膜の厚さがより大きくなるとコーティング膜表面の変形が大きくなるので、油膜厚さは増加し、さらに油膜圧力が高い領域が x 方向および y 方向ともに分散し、単位面積あたりに負荷される荷重が分担される。従って有次元最大油膜圧力はより小さく、有次元最小油膜厚さはより大きくなる。
- (4) コーティング膜の厚さが一定の場合、コーティング膜のヤング率がより大きくなると、コーティング膜および下地金属の内部で生じる最大応力は大きくなる。すなわち、下地金属のヤング率と比較して低いヤング率を持つコーティング膜材を用いることにより、材料内部で生じる応力を小さく抑えることができる。
- (5) コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合、コーティング膜の厚さの増加に伴って、材料内部で生じる最大応力は計算条件の範囲内で最大値を持つ。一方、コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合には、コーティング膜の厚さの増加に伴って、材料内部で生じる最大応力は計算条件の範囲内で最小値を持つ。これは、コーティング膜の厚さが変化すると、材料内部の応力分布が変化し、応力の高い領域が集中もしくは分散するために生じると考える。
- (6) コーティング膜のヤング率が一定の場合、コーティング膜の厚さが大きくなると、コーティング膜の性質が下地金属の性質に対して支配的になるので、最大応力が生じる位置は下地金属内からコーティング膜内へ移動する。

参考文献

[3.1] 例えば，中山秀太郎著：大学課程材料力学，オーム社，(2001).

付表 3.1(a) 油膜圧力の解析結果 ($T_c=25.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$P_{\max} (= p_{\max} / p_h)$	P_{\max} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
25.0	0.25	115.00	0.394	1.009	0.050	0.000
25.0	0.50	107.00	0.433	1.073	0.550	0.375
25.0	0.75	104.00	0.450	1.217	0.575	0.350
25.0	1.25	100.00	0.465	1.376	0.600	-0.325
25.0	1.50	99.00	0.470	1.422	0.600	-0.325
25.0	1.75	99.00	0.473	1.448	0.525	0.375
25.0	2.00	98.00	0.476	1.479	0.525	0.375

付表 3.1(b) 油膜厚さの解析結果 ($T_c=25.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$H_{\min} (= h_{\min} R_x / a^2)$	H_{\min} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
25.0	0.25	115.00	0.394	0.222	0.375	-0.700
25.0	0.50	107.00	0.433	0.262	0.375	-0.700
25.0	0.75	104.00	0.450	0.281	0.350	-0.700
25.0	1.25	100.00	0.465	0.308	0.375	-0.700
25.0	1.50	99.00	0.470	0.316	0.375	-0.700
25.0	1.75	99.00	0.473	0.317	0.350	-0.700
25.0	2.00	98.00	0.476	0.324	0.375	-0.700

付表 3.2(a) 油膜圧力の解析結果 ($T_c=36.7\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$P_{\max} (= p_{\max} / p_h)$	P_{\max} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
36.7	0.25	119.00	0.370	1.000	0.025	0.000
36.7	0.50	109.00	0.422	1.063	0.550	0.375
36.7	0.75	104.00	0.445	1.210	0.550	0.375
36.7	1.25	100.00	0.469	1.358	0.600	-0.325
36.7	1.50	99.00	0.476	1.418	0.525	0.375
36.7	1.75	98.00	0.482	1.450	0.525	0.375
36.7	2.00	97.00	0.487	1.484	0.550	0.350

付表 3.2(b) 油膜厚さの解析結果 ($T_c=36.7\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$H_{\min} (= h_{\min} R_x / a^2)$	H_{\min} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
36.7	0.25	119.00	0.370	0.208	0.400	-0.700
36.7	0.50	109.00	0.422	0.252	0.375	-0.700
36.7	0.75	104.00	0.445	0.281	0.375	-0.700
36.7	1.25	100.00	0.469	0.309	0.350	-0.700
36.7	1.50	99.00	0.476	0.316	0.350	-0.700
36.7	1.75	98.00	0.482	0.324	0.350	-0.700
36.7	2.00	97.00	0.487	0.332	0.350	-0.700

付表 3.3(a) 油膜圧力の解析結果 ($T_c=50.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$P_{\max} (= p_{\max} / p_h)$	P_{\max} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
50.0	0.25	122.00	0.348	0.993	0.025	0.000
50.0	0.50	110.00	0.408	1.059	0.525	0.400
50.0	0.75	105.00	0.439	1.211	0.575	0.350
50.0	1.25	100.00	0.474	1.362	0.525	0.375
50.0	1.50	98.00	0.485	1.411	0.525	0.375
50.0	1.75	97.00	0.494	1.445	0.550	0.350
50.0	2.00	96.00	0.502	1.488	0.550	0.350

付表 3.3(b) 油膜厚さの解析結果 ($T_c=50.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$H_{\min} (= h_{\min} R_x / a^2)$	H_{\min} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
50.0	0.25	122.00	0.348	0.200	0.425	-0.700
50.0	0.50	110.00	0.408	0.248	0.375	-0.700
50.0	0.75	105.00	0.439	0.276	0.375	-0.700
50.0	1.25	100.00	0.474	0.308	0.350	-0.700
50.0	1.50	98.00	0.485	0.323	0.350	-0.700
50.0	1.75	97.00	0.494	0.330	0.350	-0.700
50.0	2.00	96.00	0.502	0.338	0.375	-0.675

付表 3.4(a) 油膜圧力の解析結果 ($T_c=61.9\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$P_{\max}(=p_{\max} / p_h)$	P_{\max} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
61.9	0.25	124.00	0.331	0.990	0.025	0.000
61.9	0.50	111.00	0.398	1.064	0.525	0.400
61.9	0.75	105.00	0.435	1.214	0.550	0.375
61.9	1.25	99.00	0.478	1.372	0.600	-0.325
61.9	1.50	98.00	0.492	1.401	0.525	-0.375
61.9	1.75	96.00	0.504	1.443	0.525	0.375
61.9	2.00	95.00	0.514	1.465	0.675	0.225

付表 3.4(b) 油膜厚さの解析結果 ($T_c=61.9\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$H_{\min}(=h_{\min} R_x / a^2)$	H_{\min} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
61.9	0.25	124.00	0.331	0.195	0.400	-0.725
61.9	0.50	111.00	0.398	0.245	0.400	-0.700
61.9	0.75	105.00	0.435	0.276	0.375	-0.700
61.9	1.25	99.00	0.478	0.314	0.350	-0.700
61.9	1.50	98.00	0.492	0.322	0.375	-0.675
61.9	1.75	96.00	0.504	0.337	0.350	-0.700
61.9	2.00	95.00	0.514	0.344	0.375	-0.675

付表 3.5(a) 油膜圧力の解析結果 ($T_c=75.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$P_{\max} (= p_{\max} / p_h)$	P_{\max} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
75.0	0.25	127.00	0.315	0.989	0.025	0.000
75.0	0.50	112.00	0.388	1.072	0.550	0.375
75.0	0.75	106.00	0.430	1.220	0.575	0.350
75.0	1.25	99.00	0.481	1.354	0.600	-0.325
75.0	1.50	97.00	0.498	1.394	0.525	-0.375
75.0	1.75	96.00	0.513	1.435	0.550	0.350
75.0	2.00	94.00	0.525	1.458	0.525	0.375

付表 3.5(b) 油膜厚さの解析結果 ($T_c=75.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$H_{\min} (= h_{\min} R_x / a^2)$	H_{\min} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
75.0	0.25	127.00	0.315	0.188	0.400	-0.725
75.0	0.50	112.00	0.388	0.241	0.400	-0.700
75.0	0.75	106.00	0.430	0.271	0.375	-0.700
75.0	1.25	99.00	0.481	0.314	0.350	-0.700
75.0	1.50	97.00	0.498	0.328	0.350	-0.700
75.0	1.75	96.00	0.513	0.336	0.375	-0.675
75.0	2.00	94.00	0.525	0.351	0.350	-0.700

付表 3.6(a) 油膜圧力の解析結果 ($T_c=87.5\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$P_{\max} (= p_{\max} / p_h)$	P_{\max} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
87.5	0.25	128.00	0.303	0.990	0.025	0.000
87.5	0.50	113.00	0.381	1.084	0.550	0.375
87.5	0.75	106.00	0.427	1.223	0.575	0.350
87.5	1.25	99.00	0.484	1.339	0.525	0.375
87.5	1.50	97.00	0.503	1.395	0.525	0.375
87.5	1.75	95.00	0.519	1.425	0.525	0.375
87.5	2.00	94.00	0.532	1.443	0.550	0.350

付表 3.6(b) 油膜厚さの解析結果 ($T_c=87.5\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$H_{\min} (= h_{\min} R_x / a^2)$	H_{\min} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
87.5	0.25	128.00	0.303	0.186	0.400	0.725
87.5	0.50	113.00	0.381	0.238	0.400	-0.700
87.5	0.75	106.00	0.427	0.272	0.375	-0.700
87.5	1.25	99.00	0.484	0.314	0.350	-0.700
87.5	1.50	97.00	0.503	0.328	0.350	-0.700
87.5	1.75	95.00	0.519	0.342	0.350	-0.700
87.5	2.00	94.00	0.532	0.350	0.375	-0.675

付表 3.7(a) 油膜圧力の解析結果 ($T_c=100.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$P_{\max} (= p_{\max} / p_h)$	P_{\max} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
100.0	0.25	130.00	0.294	0.991	0.025	0.000
100.0	0.50	113.00	0.375	1.086	0.550	0.375
100.0	0.75	106.00	0.424	1.223	0.575	0.350
100.0	1.00	102.00	0.459	1.301	0.600	-0.325
100.0	1.25	99.00	0.486	1.343	0.525	0.375
100.0	1.50	97.00	0.507	1.390	0.525	0.375
100.0	1.75	95.00	0.524	1.420	0.525	0.375

付表 3.7(b) 油膜厚さの解析結果 ($T_c=100.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	a	p_h	$H_{\min} (= h_{\min} R_x / a^2)$	H_{\min} の発生位置	
$[\mu\text{m}]$	$[-]$	$[\mu\text{m}]$	$[\text{GPa}]$	$[-]$	$X [-]$	$Y [-]$
100.0	0.25	130.00	0.294	0.182	0.400	-0.725
100.0	0.50	113.00	0.375	0.239	0.400	-0.700
100.0	0.75	106.00	0.424	0.272	0.375	-0.700
100.0	1.00	102.00	0.459	0.295	0.375	-0.700
100.0	1.25	99.00	0.486	0.314	0.350	-0.700
100.0	1.50	97.00	0.507	0.327	0.375	-0.675
100.0	1.75	95.00	0.524	0.341	0.375	-0.675
100.0	2.00	94.00	0.538	0.349	0.375	-0.675

付表 3.8(a) 垂直応力成分の解析結果 ($T_c=25.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
25.0	0.25	0.217	-0.541	(0.650, 0.275, 0.000)	-0.556	(0.550, 0.375, 0.000)	-1.035	(0.050, 0.000, 0.000)
25.0	0.50	0.234	-0.752	(0.625, 0.300, 0.000)	-0.797	(0.525, -0.400, 0.000)	-1.158	(0.550, -0.375, 0.000)
25.0	0.75	0.240	-0.889	(0.650, 0.250, 0.000)	-0.960	(0.500, -0.400, 0.000)	-1.301	(0.575, -0.350, 0.000)
25.0	1.25	0.250	-1.084	(0.650, 0.250, 0.000)	-1.194	(0.500, -0.400, 0.000)	-1.470	(0.600, -0.325, 0.000)
25.0	1.50	0.253	-1.167	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.282	(0.500, -0.400, 0.000)	-1.516	(0.600, -0.325, 0.000)
25.0	1.75	0.253	-1.237	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.368	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.562	(0.525, -0.375, 0.000)
25.0	2.00	0.255	-1.301	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.446	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.602	(0.525, -0.375, 0.000)

付表 3.8(b) せん断応力成分の解析結果 ($T_c=25.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
25.0	0.25	0.217	0.052	(0.700, 0.425, 0.000)	0.209	(0.175, 0.600, 0.360)	0.222	(0.750, 0.000, 0.332)
25.0	0.50	0.234	0.087	(0.675, 0.400, 0.000)	0.227	(0.250, 0.575, 0.276)	0.246	(0.775, 0.000, 0.247)
25.0	0.75	0.240	0.113	(0.675, 0.400, 0.000)	0.245	(0.275, 0.550, 0.240)	0.268	(0.775, 0.000, 0.240)
25.0	1.25	0.250	-0.157	(0.675, -0.425, 0.000)	0.288	(0.425, 0.475, 0.076)	0.330	(0.750, 0.025, 0.076)
25.0	1.50	0.253	0.176	(0.675, 0.425, 0.000)	0.310	(0.375, 0.500, 0.102)	0.355	(0.775, 0.000, 0.076)
25.0	1.75	0.253	0.195	(0.675, 0.425, 0.000)	0.329	(0.375, 0.500, 0.102)	0.375	(0.775, 0.000, 0.102)
25.0	2.00	0.255	0.212	(0.700, 0.425, 0.000)	0.348	(0.375, 0.500, 0.102)	0.396	(0.775, 0.000, 0.102)

付表 3.8(c) 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果 ($T_c=25.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
25.0	0.25	0.217	0.299	(0.175, 0.000, 0.469)	0.606	(0.125, 0.025, 0.468)
25.0	0.50	0.234	0.310	(0.275, 0.000, 0.445)	0.628	(0.175, 0.025, 0.445)
25.0	0.75	0.240	0.342	(0.750, 0.000, 0.025)	0.643	(0.200, 0.025, 0.445)
25.0	1.25	0.250	0.391	(0.750, 0.000, 0.051)	0.714	(0.675, 0.250, 0.025)
25.0	1.50	0.253	0.409	(0.750, 0.000, 0.051)	0.741	(0.675, 0.250, 0.025)
25.0	1.75	0.253	0.423	(0.750, 0.000, 0.051)	0.766	(0.625, 0.300, 0.025)
25.0	2.00	0.255	0.438	(0.750, 0.000, 0.051)	0.789	(0.650, 0.275, 0.051)

付表 3.9(a) 垂直応力成分の解析結果 ($T_c=36.7\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
36.7	0.25	0.308	-0.541	(0.625, 0.300, 0.000)	-0.549	(0.575, 0.350, 0.000)	-1.028	(0.025, 0.000, 0.000)
36.7	0.50	0.337	-0.753	(0.600, 0.325, 0.000)	-0.796	(0.550, -0.375, 0.000)	-1.147	(0.550, -0.375, 0.000)
36.7	0.75	0.353	-0.891	(0.575, -0.350, 0.000)	-0.963	(0.550, -0.375, 0.000)	-1.300	(0.550, -0.375, 0.000)
36.7	1.25	0.367	-1.085	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.189	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.462	(0.525, -0.375, 0.000)
36.7	1.50	0.371	-1.160	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.283	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.526	(0.525, -0.375, 0.000)
36.7	1.75	0.374	-1.227	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.361	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.571	(0.550, -0.350, 0.000)
36.7	2.00	0.378	-1.289	(0.475, -0.400, 0.000)	-1.435	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.608	(0.550, -0.350, 0.000)

付表 3.9(b) せん断応力成分の解析結果 ($T_c=36.7\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
36.7	0.25	0.308	0.058	(0.700, 0.450, 0.000)	0.200	(0.125, 0.625, 0.417)	0.210	(0.750, 0.000, 0.388)
36.7	0.50	0.337	0.091	(0.675, 0.425, 0.000)	0.218	(0.175, 0.600, 0.360)	0.232	(0.750, 0.000, 0.337)
36.7	0.75	0.353	0.116	(0.675, 0.400, 0.000)	0.234	(0.450, 0.475, 0.076)	0.269	(0.775, 0.000, 0.076)
36.7	1.25	0.367	0.154	(0.675, 0.400, 0.000)	0.287	(0.375, 0.500, 0.102)	0.327	(0.775, 0.000, 0.076)
36.7	1.50	0.371	0.170	(0.675, 0.400, 0.000)	0.308	(0.375, 0.500, 0.127)	0.349	(0.775, 0.000, 0.102)
36.7	1.75	0.374	0.185	(0.675, -0.400, 0.000)	0.326	(0.350, 0.500, 0.127)	0.369	(0.775, 0.000, 0.102)
36.7	2.00	0.378	-0.198	(0.675, -0.425, 0.000)	0.344	(0.350, 0.500, 0.127)	0.388	(0.775, 0.000, 0.102)

付表 3.9(c) 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果 ($T_c=36.7\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
36.7	0.25	0.308	0.292	(0.175, 0.000, 0.494)	0.592	(0.125, 0.025, 0.494)
36.7	0.50	0.337	0.305	(0.275, 0.000, 0.445)	0.619	(0.175, 0.025, 0.468)
36.7	0.75	0.353	0.343	(0.750, 0.000, 0.051)	0.640	(0.200, 0.025, 0.445)
36.7	1.25	0.367	0.391	(0.750, 0.000, 0.025)	0.717	(0.650, 0.275, 0.025)
36.7	1.50	0.371	0.405	(0.750, 0.000, 0.051)	0.742	(0.625, 0.300, 0.025)
36.7	1.75	0.374	0.419	(0.750, 0.000, 0.051)	0.784	(0.300, 0.050, 0.341)
36.7	2.00	0.378	0.432	(0.750, 0.000, 0.051)	0.845	(0.275, 0.025, 0.355)

付表 3.10(a) 垂直応力成分の解析結果 ($T_c=50.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
50.0	0.25	0.410	-0.549	(0.650, 0.250, 0.000)	-0.556	(0.575, 0.350, 0.000)	-1.023	(0.025, 0.000, 0.000)
50.0	0.50	0.455	-0.764	(0.625, 0.300, 0.000)	-0.805	(0.525, -0.400, 0.000)	-1.144	(0.550, -0.375, 0.000)
50.0	0.75	0.476	-0.896	(0.650, 0.250, 0.000)	-0.962	(0.575, -0.350, 0.000)	-1.302	(0.575, -0.350, 0.000)
50.0	1.25	0.500	-1.079	(0.600, 0.300, 0.000)	-1.188	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.469	(0.525, -0.375, 0.000)
50.0	1.50	0.510	-1.147	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.271	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.521	(0.525, -0.375, 0.000)
50.0	1.75	0.515	-1.207	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.340	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.562	(0.550, -0.350, 0.000)
50.0	2.00	0.521	-1.259	(0.475, -0.400, 0.000)	-1.407	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.600	(0.550, -0.350, 0.000)

付表 3.10(b) せん断応力成分の解析結果 ($T_c=50.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
50.0	0.25	0.410	0.065	(0.700, 0.475, 0.000)	0.191	(0.100, 0.625, 0.494)	0.202	(0.750, 0.000, 0.410)
50.0	0.50	0.455	0.097	(0.700, 0.425, 0.000)	0.206	(0.125, 0.625, 0.455)	0.232	(0.775, 0.000, 0.076)
50.0	0.75	0.476	0.119	(0.675, 0.400, 0.000)	0.237	(0.400, 0.500, 0.102)	0.272	(0.775, 0.000, 0.076)
50.0	1.25	0.500	0.151	(0.675, 0.400, 0.000)	0.284	(0.375, 0.500, 0.127)	0.322	(0.750, 0.000, 0.102)
50.0	1.50	0.510	0.163	(0.675, 0.400, 0.000)	0.301	(0.375, 0.500, 0.127)	0.343	(0.775, 0.000, 0.076)
50.0	1.75	0.515	-0.174	(0.675, 0.400, 0.000)	0.318	(0.300, 0.525, 0.178)	0.358	(0.775, 0.000, 0.102)
50.0	2.00	0.521	0.183	(0.675, 0.400, 0.000)	0.332	(0.300, 0.525, 0.178)	0.373	(0.775, 0.000, 0.102)

付表 3.10(c) 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果 ($T_c=50.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
50.0	0.25	0.410	0.298	(0.075, 0.000, 0.228)	0.601	(0.075, 0.000, 0.229)
50.0	0.50	0.455	0.308	(0.750, 0.000, 0.051)	0.612	(0.150, 0.025, 0.494)
50.0	0.75	0.476	0.344	(0.750, 0.000, 0.051)	0.636	(0.675, 0.250, 0.025)
50.0	1.25	0.500	0.385	(0.750, 0.000, 0.025)	0.715	(0.625, 0.300, 0.025)
50.0	1.50	0.510	0.404	(0.750, 0.000, 0.025)	0.745	(0.150, 0.025, 0.487)
50.0	1.75	0.515	0.413	(0.750, 0.000, 0.025)	0.788	(0.150, 0.025, 0.487)
50.0	2.00	0.521	0.421	(0.750, 0.000, 0.025)	0.834	(0.125, 0.000, 0.494)

付表 3.11(a) 垂直応力成分の解析結果 ($T_c=61.9\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
61.9	0.25	0.499	-0.561	(0.650, 0.250, 0.000)	-0.567	(0.575, 0.350, 0.000)	-1.021	(0.025, 0.000, 0.000)
61.9	0.50	0.558	-0.774	(0.625, 0.300, 0.000)	-0.815	(0.525, -0.400, 0.000)	-1.152	(0.550, -0.375, 0.000)
61.9	0.75	0.590	-0.902	(0.575, -0.350, 0.000)	-0.975	(0.550, -0.375, 0.000)	-1.307	(0.550, -0.375, 0.000)
61.9	1.25	0.625	-1.071	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.177	(0.500, -0.400, 0.000)	-1.458	(0.600, -0.325, 0.000)
61.9	1.50	0.632	-1.135	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.250	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.511	(0.550, -0.350, 0.000)
61.9	1.75	0.645	-1.188	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.319	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.548	(0.525, -0.375, 0.000)
61.9	2.00	0.652	-1.234	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.372	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.579	(0.550, -0.350, 0.000)

付表 3.11(b) せん断応力成分の解析結果 ($T_c=61.9\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
61.9	0.25	0.499	0.072	(0.700, 0.475, 0.000)	0.186	(0.075, 0.650, 0.522)	0.194	(0.725, 0.000, 0.522)
61.9	0.50	0.558	0.102	(0.700, 0.425, 0.000)	0.205	(0.400, 0.525, 0.127)	0.237	(0.775, 0.000, 0.076)
61.9	0.75	0.590	0.122	(0.675, 0.425, 0.000)	0.239	(0.400, 0.500, 0.102)	0.275	(0.775, 0.000, 0.076)
61.9	1.25	0.625	0.148	(0.675, 0.400, 0.000)	0.281	(0.375, 0.500, 0.102)	0.322	(0.775, 0.000, 0.076)
61.9	1.50	0.632	0.158	(0.675, 0.375, 0.000)	0.295	(0.350, 0.500, 0.127)	0.335	(0.775, 0.000, 0.102)
61.9	1.75	0.645	-0.166	(0.675, -0.400, 0.000)	0.308	(0.300, 0.525, 0.178)	0.351	(0.775, 0.000, 0.076)
61.9	2.00	0.652	0.173	(0.675, 0.375, 0.000)	0.320	(0.300, 0.525, 0.178)	0.361	(0.775, 0.000, 0.076)

付表 3.11(c) 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果 ($T_c=61.9\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
61.9	0.25	0.499	0.309	(0.075, 0.000, 0.247)	0.624	(0.075, 0.000, 0.276)
61.9	0.50	0.558	0.314	(0.200, 0.000, 0.332)	0.635	(0.150, 0.025, 0.332)
61.9	0.75	0.590	0.347	(0.750, 0.000, 0.051)	0.645	(0.225, 0.025, 0.360)
61.9	1.25	0.625	0.389	(0.750, 0.000, 0.025)	0.710	(0.650, 0.275, 0.025)
61.9	1.50	0.632	0.395	(0.750, 0.000, 0.025)	0.728	(0.625, 0.300, 0.025)
61.9	1.75	0.645	0.411	(0.750, 0.025, 0.025)	0.745	(0.625, 0.300, 0.025)
61.9	2.00	0.652	0.418	(0.750, 0.000, 0.025)	0.776	(0.075, 0.000, 0.628)

付表 3.12(a) 垂直応力成分の解析結果 ($T_c=75.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
75.0	0.25	0.591	-0.576	(0.650, 0.250, 0.000)	-0.582	(0.575, -0.350, 0.000)	-1.021	(0.025, 0.000, 0.000)
75.0	0.50	0.670	-0.786	(0.600, 0.325, 0.000)	-0.828	(0.550, -0.375, 0.000)	-1.164	(0.550, -0.375, 0.000)
75.0	0.75	0.708	-0.908	(0.650, 0.250, 0.000)	-0.979	(0.500, -0.400, 0.000)	-1.310	(0.575, -0.350, 0.000)
75.0	1.25	0.758	-1.066	(0.625, 0.275, 0.000)	-1.166	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.449	(0.525, -0.375, 0.000)
75.0	1.50	0.773	-1.122	(0.600, 0.300, 0.000)	-1.239	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.503	(0.525, -0.375, 0.000)
75.0	1.75	0.781	-1.167	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.293	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.542	(0.550, -0.350, 0.000)
75.0	2.00	0.798	-1.209	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.344	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.563	(0.525, -0.375, 0.000)

付表 3.12(b) せん断応力成分の解析結果 ($T_c=75.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
75.0	0.25	0.591	0.079	(0.700, 0.475, 0.000)	0.179	(0.075, 0.650, 0.591)	0.189	(0.775, 0.000, 0.127)
75.0	0.50	0.670	0.107	(0.700, 0.425, 0.000)	0.210	(0.400, 0.525, 0.127)	0.243	(0.775, 0.025, 0.102)
75.0	0.75	0.708	-0.124	(0.675, -0.425, 0.000)	0.242	(0.400, 0.500, 0.102)	0.277	(0.775, 0.000, 0.076)
75.0	1.25	0.758	0.146	(0.675, 0.400, 0.000)	0.278	(0.375, 0.500, 0.102)	0.319	(0.775, 0.000, 0.076)
75.0	1.50	0.773	0.153	(0.675, 0.375, 0.000)	0.291	(0.400, 0.475, 0.076)	0.332	(0.775, 0.000, 0.076)
75.0	1.75	0.781	0.159	(0.675, 0.375, 0.000)	0.300	(0.425, 0.450, 0.051)	0.341	(0.775, 0.000, 0.076)
75.0	2.00	0.798	0.164	(0.675, 0.375, 0.000)	0.308	(0.400, 0.475, 0.076)	0.353	(0.775, 0.050, 0.076)

付表 3.12(c) 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果 ($T_c=75.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
75.0	0.25	0.591	0.319	(0.075, 0.000, 0.304)	0.646	(0.075, 0.000, 0.304)
75.0	0.50	0.670	0.321	(0.150, 0.000, 0.360)	0.653	(0.125, 0.000, 0.360)
75.0	0.75	0.708	0.347	(0.750, 0.000, 0.051)	0.654	(0.175, 0.025, 0.388)
75.0	1.25	0.758	0.387	(0.750, 0.000, 0.025)	0.710	(0.650, 0.275, 0.025)
75.0	1.50	0.773	0.399	(0.750, 0.000, 0.025)	0.727	(0.650, 0.275, 0.025)
75.0	1.75	0.781	0.401	(0.750, 0.000, 0.025)	0.732	(0.625, 0.300, 0.025)
75.0	2.00	0.798	0.412	(0.750, 0.025, 0.025)	0.749	(0.650, 0.275, 0.025)

付表 3.13(a) 垂直応力成分の解析結果 ($T_c=87.5\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
87.5	0.25	0.684	-0.591	(0.650, 0.250, 0.000)	-0.604	(0.050, 0.000, 0.000)	-1.023	(0.025, 0.000, 0.000)
87.5	0.50	0.774	-0.796	(0.600, 0.325, 0.000)	-0.844	(0.550, -0.375, 0.000)	-1.175	(0.550, -0.375, 0.000)
87.5	0.75	0.825	-0.913	(0.650, 0.250, 0.000)	-0.986	(0.575, -0.350, 0.000)	-1.317	(0.575, -0.350, 0.000)
87.5	1.25	0.884	-1.061	(0.625, 0.275, 0.000)	-1.161	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.450	(0.525, -0.375, 0.000)
87.5	1.50	0.902	-1.110	(0.600, 0.300, 0.000)	-1.225	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.497	(0.525, -0.375, 0.000)
87.5	1.75	0.921	-1.153	(0.600, 0.300, 0.000)	-1.276	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.529	(0.525, -0.375, 0.000)
87.5	2.00	0.931	-1.188	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.313	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.553	(0.550, -0.350, 0.000)

付表 3.13(b) せん断応力成分の解析結果 ($T_c=87.5\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
87.5	0.25	0.684	0.085	(0.700, 0.500, 0.000)	0.171	(0.050, 0.675, 0.684)	0.197	(0.800, 0.000, 0.127)
87.5	0.50	0.774	0.111	(0.700, 0.425, 0.000)	0.214	(0.400, 0.525, 0.127)	0.249	(0.775, 0.000, 0.102)
87.5	0.75	0.825	0.126	(0.675, 0.425, 0.000)	0.244	(0.400, 0.500, 0.102)	0.280	(0.775, 0.000, 0.076)
87.5	1.25	0.884	-0.144	(0.675, -0.400, 0.000)	0.277	(0.450, 0.450, 0.051)	0.316	(0.775, 0.000, 0.076)
87.5	1.50	0.902	0.150	(0.675, 0.375, 0.000)	0.288	(0.400, 0.475, 0.076)	0.327	(0.775, 0.000, 0.076)
87.5	1.75	0.921	0.155	(0.675, 0.375, 0.000)	0.296	(0.475, 0.425, 0.025)	0.338	(0.775, 0.000, 0.076)
87.5	2.00	0.931	0.159	(0.675, 0.375, 0.000)	0.303	(0.425, 0.450, 0.051)	0.345	(0.775, 0.000, 0.076)

付表 3.13(c) 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果 ($T_c=87.5\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
87.5	0.25	0.684	0.326	(0.075, 0.000, 0.332)	0.660	(0.050, 0.000, 0.332)
87.5	0.50	0.774	0.325	(0.125, 0.000, 0.388)	0.662	(0.100, 0.000, 0.388)
87.5	0.75	0.825	0.351	(0.750, 0.000, 0.051)	0.658	(0.175, 0.025, 0.388)
87.5	1.25	0.884	0.385	(0.750, 0.000, 0.025)	0.708	(0.650, 0.275, 0.025)
87.5	1.50	0.902	0.394	(0.750, 0.075, 0.025)	0.724	(0.625, 0.300, 0.025)
87.5	1.75	0.921	0.404	(0.750, 0.000, 0.025)	0.736	(0.625, 0.300, 0.025)
87.5	2.00	0.931	0.409	(0.750, 0.000, 0.025)	0.740	(0.625, 0.300, 0.025)

付表 3.14(a) 垂直応力成分の解析結果 ($T_c=100.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$	$\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
100.0	0.25	0.769	-0.609	(0.050, 0.000, 0.000)	-0.626	(0.050, 0.000, 0.000)	-1.026	(0.050, 0.000, 0.000)
100.0	0.50	0.885	-0.808	(0.625, 0.300, 0.000)	-0.855	(0.550, -0.375, 0.000)	-1.180	(0.550, -0.375, 0.000)
100.0	0.75	0.943	-0.918	(0.575, -0.350, 0.000)	-0.994	(0.550, -0.375, 0.000)	-1.321	(0.575, -0.350, 0.000)
100.0	1.00	0.980	-0.998	(0.625, 0.275, 0.000)	-1.087	(0.500, -0.400, 0.000)	-1.388	(0.500, -0.400, 0.000)
100.0	1.25	1.010	-1.056	(0.625, 0.275, 0.000)	-1.157	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.450	(0.525, -0.375, 0.000)
100.0	1.50	1.031	-1.101	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.210	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.488	(0.525, -0.375, 0.000)
100.0	1.75	1.053	-1.139	(0.550, -0.350, 0.000)	-1.256	(0.525, -0.375, 0.000)	-1.518	(0.525, -0.375, 0.000)
100.0	2.00	1.064	-1.169	(0.575, -0.325, 0.000)	-1.294	(0.500, -0.350, 0.000)	-1.551	(0.550, -0.350, 0.000)

付表 3.14(b) せん断応力成分の解析結果 ($T_c=100.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c/E_s	Z_c	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$	$\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$	$\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ の発生位置	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$	$\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
100.0	0.25	0.769	0.091	(0.700, 0.500, 0.000)	0.175	(0.375, 0.575, 0.178)	0.204	(0.775, 0.000, 0.152)
100.0	0.50	0.885	-0.114	(0.700, -0.450, 0.000)	0.219	(0.350, 0.550, 0.178)	0.252	(0.775, 0.000, 0.102)
100.0	0.75	0.943	0.128	(0.675, 0.425, 0.000)	0.245	(0.400, 0.500, 0.102)	0.282	(0.775, 0.000, 0.076)
100.0	1.00	0.980	0.136	(0.675, 0.400, 0.000)	0.263	(0.425, 0.475, 0.076)	0.300	(0.775, 0.000, 0.076)
100.0	1.25	1.010	-0.143	(0.675, -0.400, 0.000)	0.276	(0.450, 0.450, 0.051)	0.314	(0.775, 0.000, 0.076)
100.0	1.50	1.031	0.148	(0.675, 0.375, 0.000)	0.286	(0.400, 0.475, 0.076)	0.323	(0.775, 0.000, 0.076)
100.0	1.75	1.053	0.152	(0.675, 0.375, 0.000)	0.294	(0.425, 0.450, 0.025)	0.333	(0.775, 0.000, 0.076)
100.0	2.00	1.064	0.155	(0.650, 0.375, 0.000)	0.301	(0.425, 0.450, 0.051)	0.338	(0.775, 0.000, 0.076)

付表 3.14(c) 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果 ($T_c=100.0\mu\text{m}$)

T_c	E_c / E_s	Z_c	$\tau_{\text{max-max}} / p_h$	$\tau_{\text{max-max}} / p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}} / p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}} / p_h$ の発生位置
[μm]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
100.0	0.25	0.769	0.330	(0.050, 0.000, 0.360)	0.668	(0.050, 0.000, 0.360)
100.0	0.50	0.885	0.328	(0.125, 0.000, 0.388)	0.666	(0.125, 0.000, 0.388)
100.0	0.75	0.943	0.353	(0.750, 0.000, 0.051)	0.660	(0.175, 0.025, 0.417)
100.0	1.00	0.980	0.368	(0.750, 0.000, 0.025)	0.684	(0.650, 0.275, 0.025)
100.0	1.25	1.010	0.383	(0.750, 0.000, 0.025)	0.708	(0.625, 0.300, 0.025)
100.0	1.50	1.031	0.390	(0.750, 0.050, 0.025)	0.721	(0.625, 0.300, 0.025)
100.0	1.75	1.053	0.402	(0.750, 0.050, 0.025)	0.733	(0.625, 0.300, 0.025)
100.0	2.00	1.064	0.402	(0.750, 0.000, 0.025)	0.736	(0.675, 0.225, 0.025)

第4章 中間層を有するコーティング膜の応力分布と油膜厚さ

前章では，図 2.1(a)に示される下地金属上にコーティング膜が一層施されたモデルに対して，第2章に示した解析方法を用いて，油膜圧力，油膜厚さならびにコーティング膜および下地金属内に生じる応力状態を解析した結果を示し考察を行った．

実際にコーティング膜を施す際には，コーティング膜と下地金属との密着力の強化を目的として，コーティング膜と下地金属との間に双方とは性質が異なる層（以下、中間層という）を用いる場合がある．

そこで本章では，第2章に示した解析方法を用いて，図 2.1(b)に示される下地金属とコーティング膜の間に双方とは性質が全く異なる中間層が施されたモデルについて油膜圧力，油膜厚さならびにコーティング膜，中間層および下地金属内に生じる応力状態を解析した結果を示し考察を行う．

4. 1 解析条件

本研究の解析条件を表 4.1 に示す．球および下地金属は鋼材（ヤング率 206GPa，ポアソン比は 0.3）とする．通常，下地金属と比べて低い硬度を有するコーティング膜を軟質コーティング膜，下地金属と比べて高い硬度を有するコーティング膜を硬質コーティング膜とそれぞれ定義する^[4,1]．しかしながら，下地金属と比べて低いヤング率を有するコーティング膜は，下地金属より硬度も低く，下地金属より高いヤング率を有するコーティング膜は，下地金属より硬度も高いと考える．そこで本研究では，下地金属のヤング率に対して 0.5 倍のヤング率を有するコーティング膜を軟質コーティング膜と定義して扱う．一方，下地金属のヤング率に対して 2.0 倍のヤング率を有するコーティング膜を硬質コーティング膜と定義して扱う．コーティング膜のポアソン比は，軟質コーティング膜および硬質コーティング膜問わず 0.3 とする．また非常にやわらかい材料から非常に硬い材料まで多種多様な材料が中間層に使用された場合に対し幅広く考察を行うために，中間層内のヤング率 E_m は，下地金属のヤング率の 0.25 倍～2.50 倍 ($E_m=51.5[\text{GPa}] \sim 515.0[\text{GPa}]$) の値とし，ポアソン比は 0.3 を使用して解析を行う．

表 4.1 解析条件

無次元荷重パラメータ, W	1.73×10^{-7}
無次元速度パラメータ, U	8.83×10^{-12}
無次元材料パラメータ, G	4980
球のヤング率, E_b [GPa]	206
球のポアソン比, κ_b	0.3
コーティング膜のヤング率, E_c [GPa]	103.0 ($E_c/E_s=0.50$) , 412.0 ($E_c/E_s=2.00$)
コーティング膜のポアソン比, κ_c	0.3
中間層のヤング率, E_m [GPa]	51.5～515.0 ($E_m/E_s=0.25 \sim 2.50$)
中間層のポアソン比, κ_m	0.3
下地金属のヤング率, E_s [GPa]	206
下地金属のポアソン比, κ_s	0.3
コーティング膜の厚さ, T_c [μm]	25.0～100.0
中間層の厚さ, T_m [μm]	5.0～25.0

4. 2 油膜圧力および油膜厚さ

油膜圧力および油膜厚さを解析した結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 軟質コーティング膜を施した場合 ($E_c/E_s=0.5$) には、中間層のヤング率がより大きくなると、有次元最大油膜圧力はより大きく、有次元最小油膜厚さはより小さくなる。
- (2) 軟質コーティング膜を施した場合には、中間層のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合、中間層の厚さがより大きくなると、有次元最大油膜圧力はより小さく、有次元最小油膜厚さはより大きくなる。一方、中間層のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合には、中間層の厚さがより大きくなると、有次元最大油膜圧力はより大きく、有次元最小油膜厚さはより小さくなる。
- (3) 硬質コーティング膜を施した場合 ($E_c/E_s=2.0$) には、中間層のヤング率がより大きくなると、軟質コーティング膜を施した場合と同様に有次元最小油膜厚さはより小さくなる。しかしながら、有次元油膜圧力に関しては、計算時間と計算機の性能による制約上、定性的な傾向を正確に把握することができない。
- (4) 硬質コーティング膜を施した場合 ($E_c/E_s=2.0$) には、中間層のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合、中間層の厚さがより大きくなると有次元最小油膜厚さはより小さくなり、中間層のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合、中間層の厚さがより大きくなると有次元最小油膜厚さはより大きくなる。しかしながら、有次元油膜圧力に関しては、計算時間と計算機の性能による制約上、定性的な傾向を正確に把握することができない。

以下にその詳細について述べるとともに考察を行う。

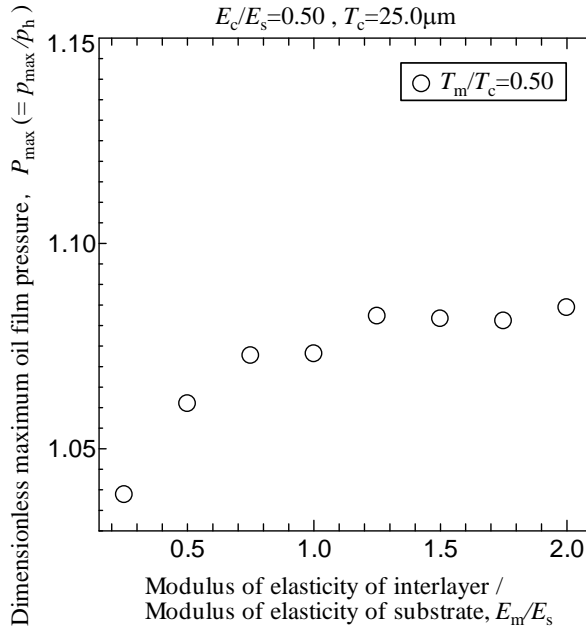
4. 2. 1 軟質コーティング膜の場合 ($E_c/E_s=0.5$ の場合)

図 4.1 は、コーティング膜と下地金属のヤング率比 E_c/E_s を 0.5 一定とした場合の中間層とコーティング膜のヤング率比 E_m/E_s と無次元最大油膜圧力 P_{\max} の関係、図 4.2 は、 E_m/E_s と無次元最小油膜厚さ H_{\min} の関係を示す。また図 4.3 は、 E_m/E_s と有次元最大油膜圧力 p_{\max} の関係、図 4.4 は、 E_m/E_s と有次元最小油膜厚さ h_{\min} の関係を示す。

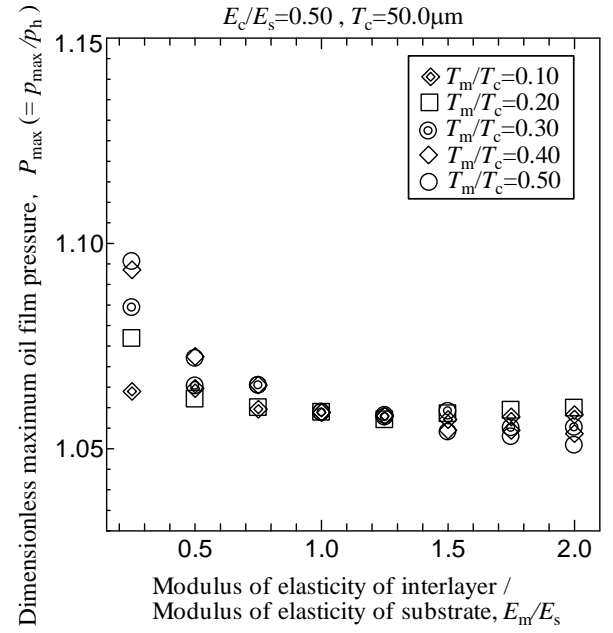
(a) 中間層と下地金属のヤング率比の影響

図 4.1～図 4.4 において、 P_{\max} 、 H_{\min} 、 p_{\max} および h_{\min} に対する E_m/E_s の影響について解析結果を示し考察を行う。

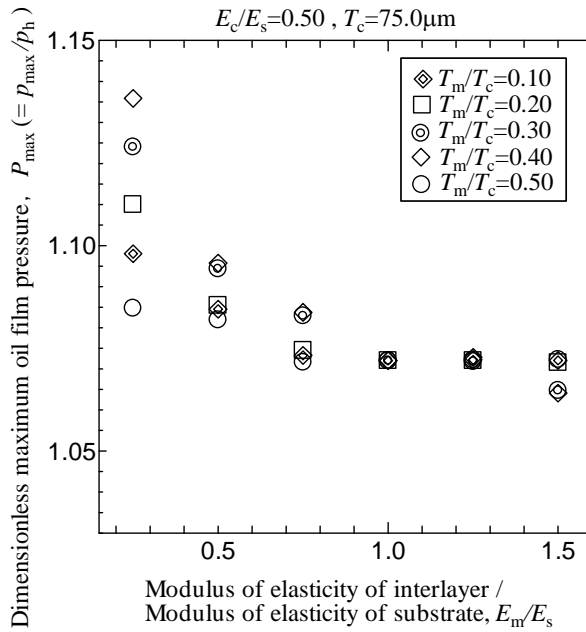
同一 T_m/T_c で比較をすると、 E_m/E_s がより大きいほど P_{\max} はより小さく、 H_{\min} はより大きくなる。しかしながら、 $T_c=25.0[\mu\text{m}]$ の場合には、 E_m/E_s がより大きいほど、



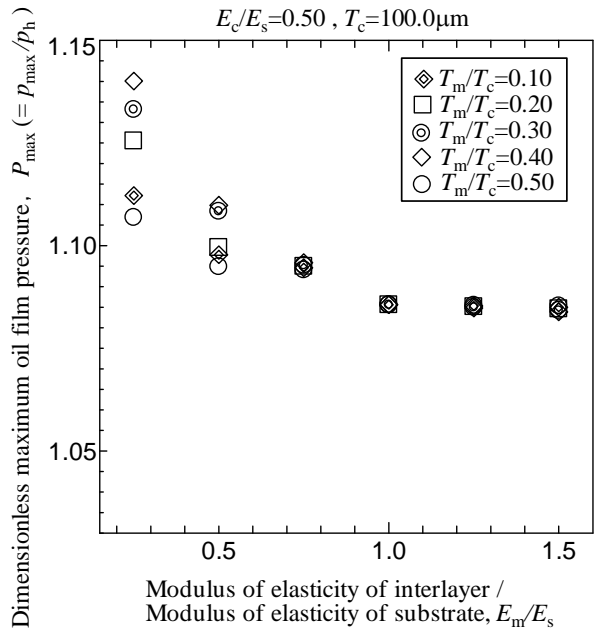
(a) $T_c=25.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$



(b) $T_c=50.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$

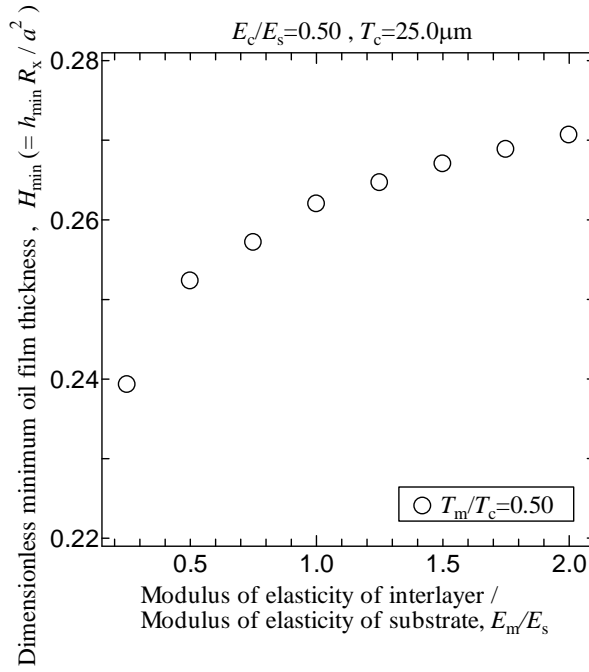


(c) $T_c=75.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$

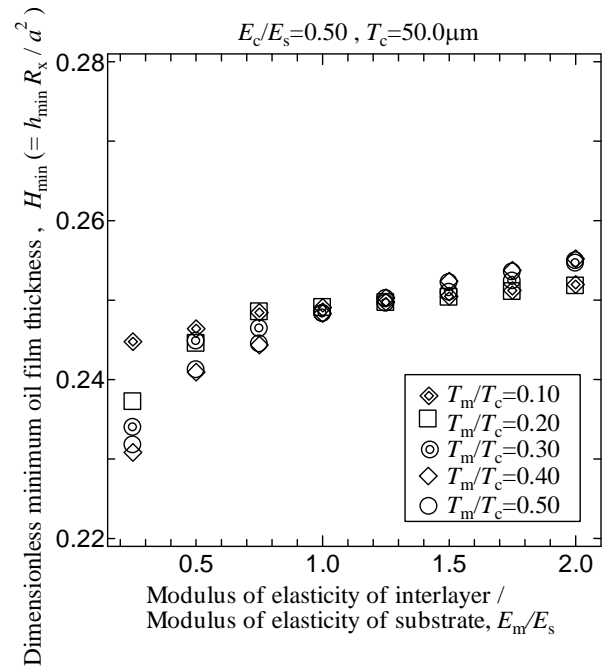


(d) $T_c=100.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$

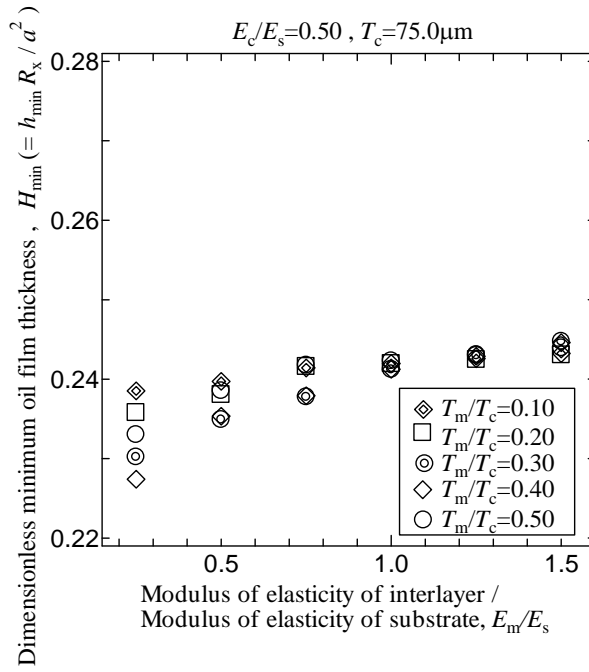
図 4.1 E_m/E_s と P_{\max} の関係



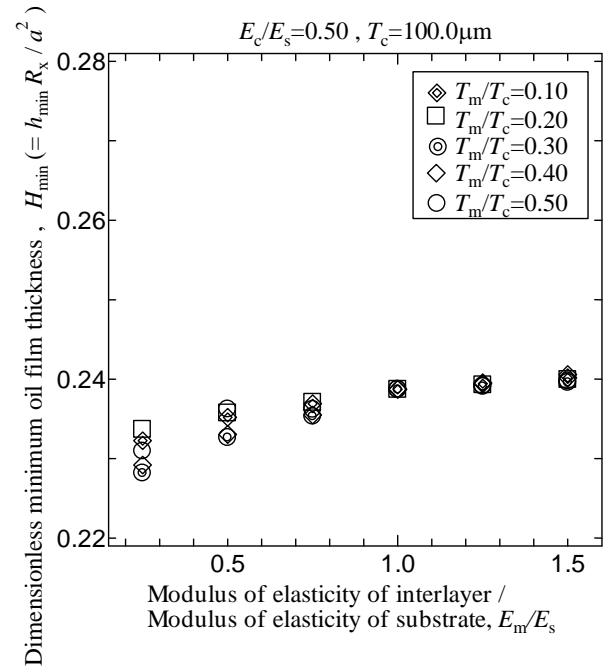
(a) $T_c=25.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$



(b) $T_c=50.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$

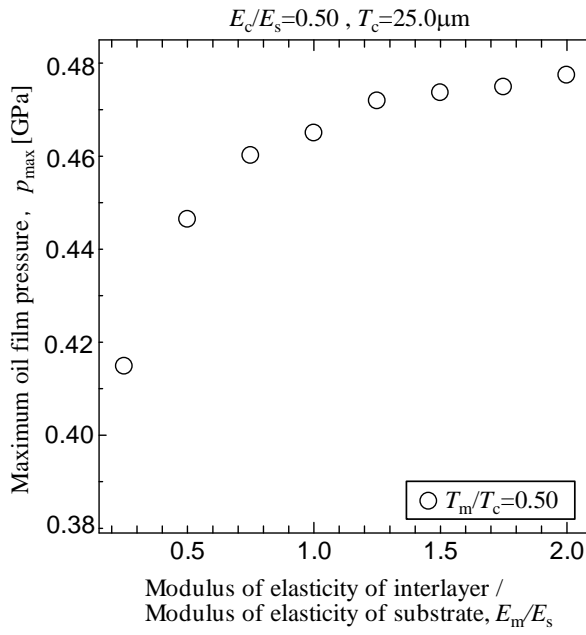


(c) $T_c=75.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$

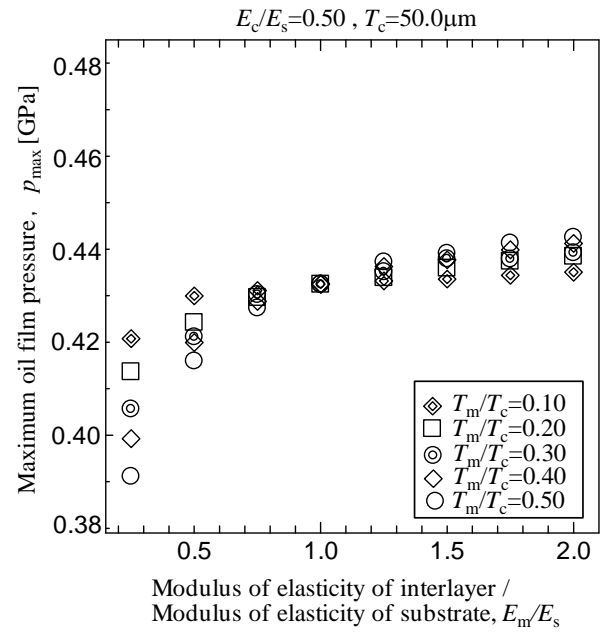


(d) $T_c=100.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$

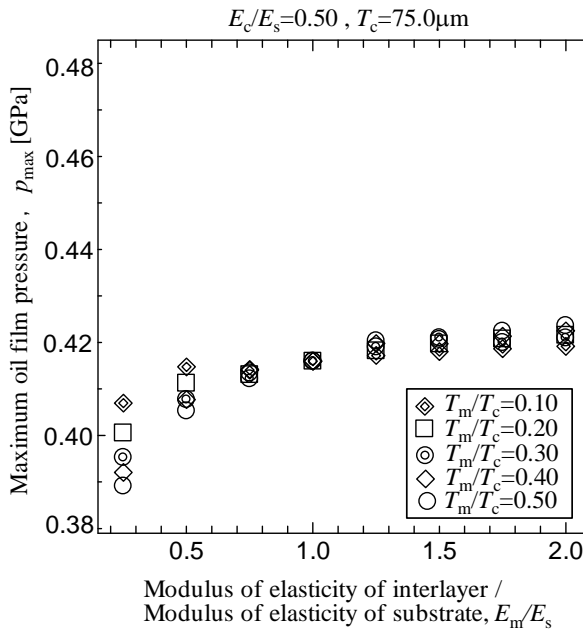
図 4.2 E_m/E_s と H_{\min} の関係



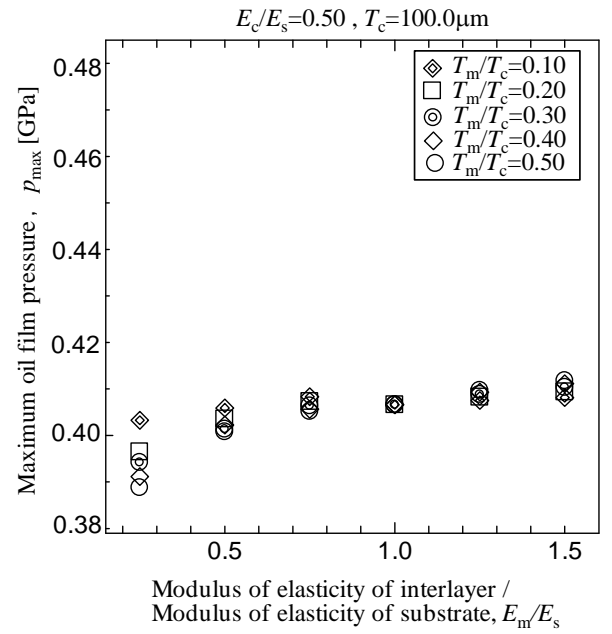
(a) $T_c=25.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$



(b) $T_c=50.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$

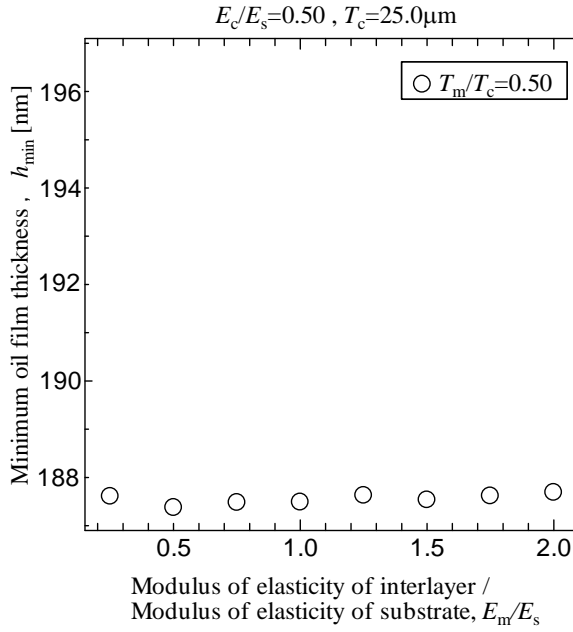


(c) $T_c=75.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$

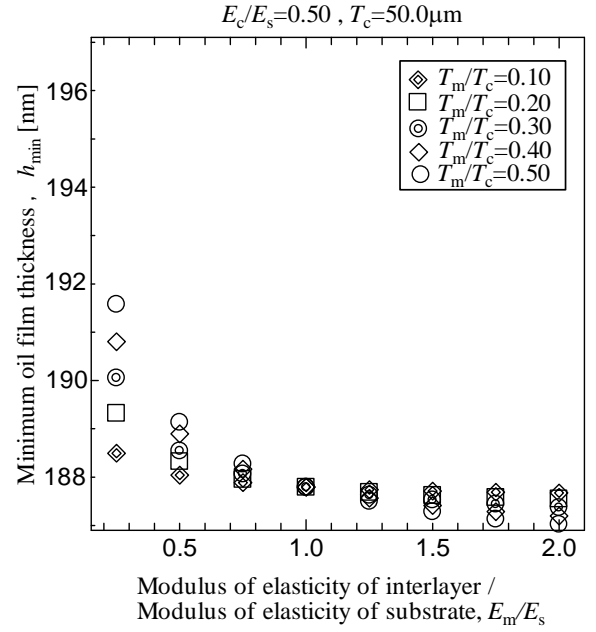


(d) $T_c=100.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$

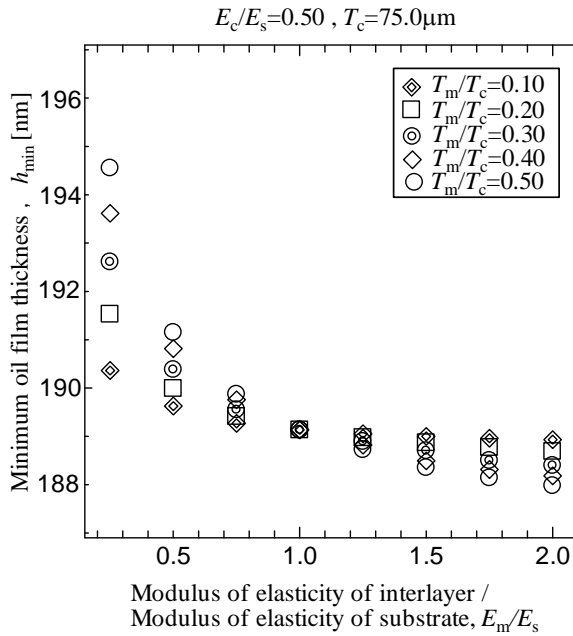
図 4.3 E_m/E_s と p_{max} の関係



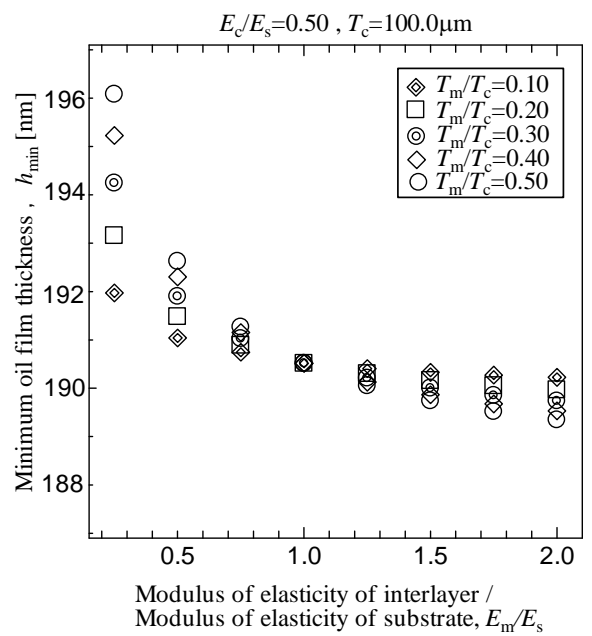
(a) $T_c=25.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$



(b) $T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$



(c) $T_c=75.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$



(d) $T_c=100.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$

図 4.4 E_m/E_s と h_{\min} の関係

P_{\max} はより大きい．この結果は $T_c=25.0[\mu\text{m}]$ の場合には， E_m/E_s の変化に伴う p_{\max} の変化量は p_h の変化量より大きく，それ以外では， p_{\max} の変化量は p_h の変化量より小さいことを意味している．また E_m/E_s の変化に伴う h_{\min} の変化量がヘルツ接触半幅 a の変化量より大きいことを表している．次に p_{\max} および h_{\min} を比較すると， E_m/E_s がより大きいほど， p_{\max} はより大きく， h_{\min} はより小さい．中間層のヤング率が増加すると，油膜圧力によって生じるコーティング膜表面の変形が小さくなる．そのため有次元油膜圧力の高い領域が x 方向および y 方向ともに接触中心に集中するために， p_{\max} は大きく， h_{\min} は小さくなると考える．このように，中間層がある場合においては，無次元油膜圧力と有次元油膜厚さおよび無次元油膜厚さと有次元油膜厚さは定性的に逆の傾向を示す．

(b) 中間層とコーティング膜の厚さ比の影響

図 4.1～図 4.4 において， P_{\max} ， H_{\min} ， p_{\max} および h_{\min} に対する T_m/T_c の影響について解析結果を示し考察を行う．

同一 E_m/E_s で比較をすると， T_m/T_c がより大きいほど， E_m/E_s の変化に対する P_{\max} ， H_{\min} ， p_{\max} および h_{\min} の変化は大きい．すなわち T_m/T_c がより大きいほど P_{\max} ， H_{\min} ， p_{\max} および h_{\min} に与える影響が大きい．また E_m/E_s 値が 1.0 以下の場合には， T_m/T_c がより大きいほど， p_{\max} はより小さく， h_{\min} はより大きくなるのに対して， E_m/E_s 値が 1.0 以上の場合には，その傾向は逆転する． E_m/E_s 値が 1.0 以下で， T_m/T_c がより小さい場合，もしくは E_m/E_s 値が 1.0 以上で， T_m/T_c がより大きい場合には，中間層の性質が硬くなる．従って，油膜圧力によって生じる変形量が小さくなる．そのため有次元油膜圧力の高い領域が接触中心に集中するために p_{\max} はより大きく， h_{\min} はより小さくなると考える．

4. 2. 2 硬質コーティング膜の場合 ($E_c/E_s=2.0$ の場合)

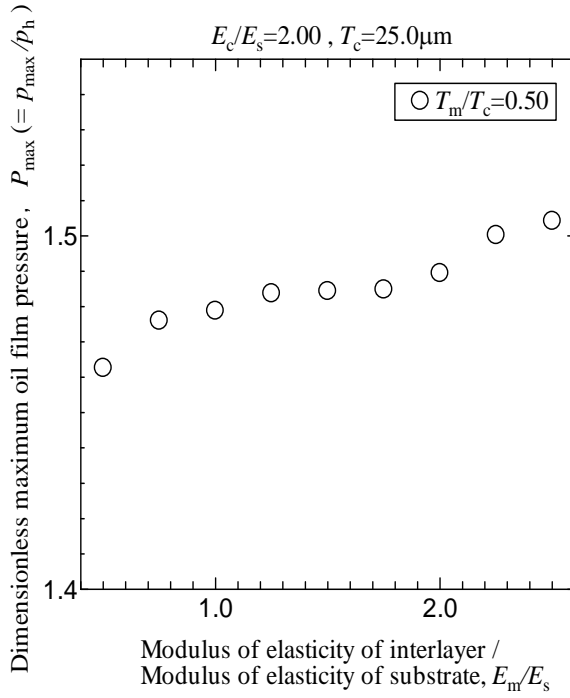
図 4.5 は，コーティング膜と下地金属のヤング率比 E_c/E_s を 2.0 一定とした場合の中間層とコーティング膜とのヤング率比 E_m/E_s と無次元最大油膜圧力 P_{\max} の関係，図 4.6 は， E_m/E_s と無次元最小油膜厚さ H_{\min} の関係を示す．

また図 4.7 は， E_m/E_s と有次元最大油膜圧力 p_{\max} の関係，図 4.8 は， E_m/E_s と有次元最小油膜厚さ h_{\min} の関係を示す．

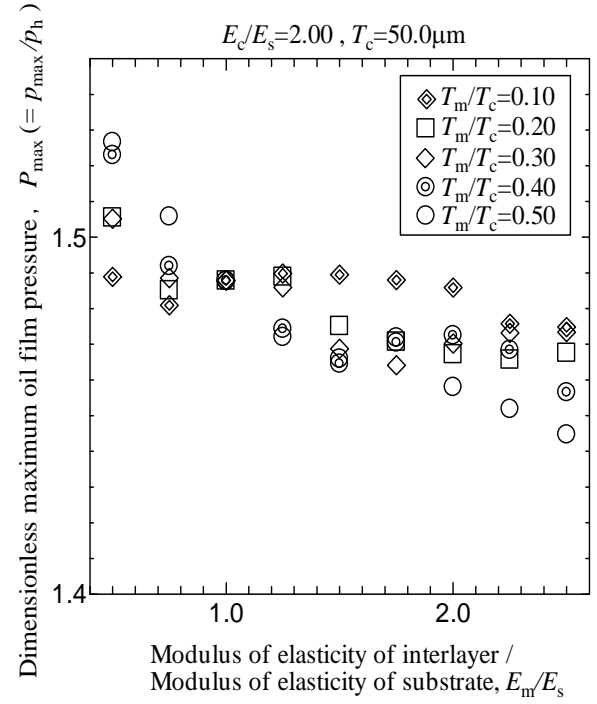
(a) 中間層と下地金属のヤング率比の影響

図 4.7 および図 4.8 において， p_{\max} および h_{\min} に対する E_m/E_s の影響について解析結果を示し考察を行う．

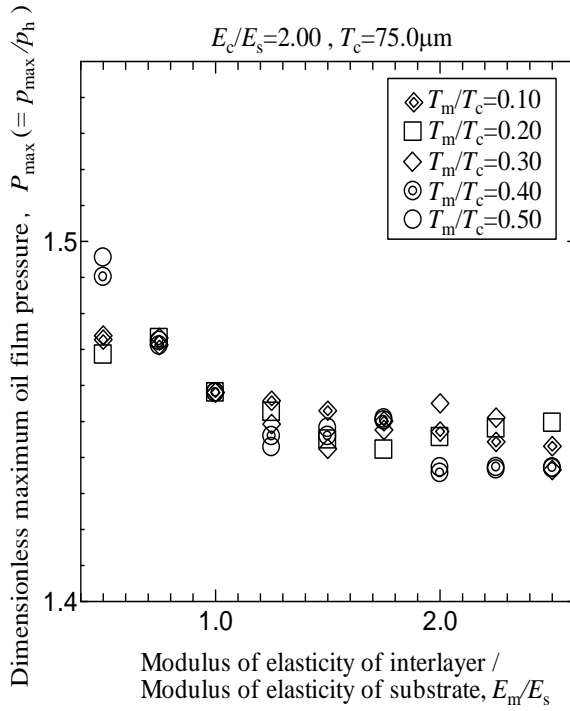
同一 T_m/T_c で比較をすると， h_{\min} に関しては $E_c/E_s=0.5$ と同様に E_m/E_s がより大きいほど， h_{\min} はより小さくなる．



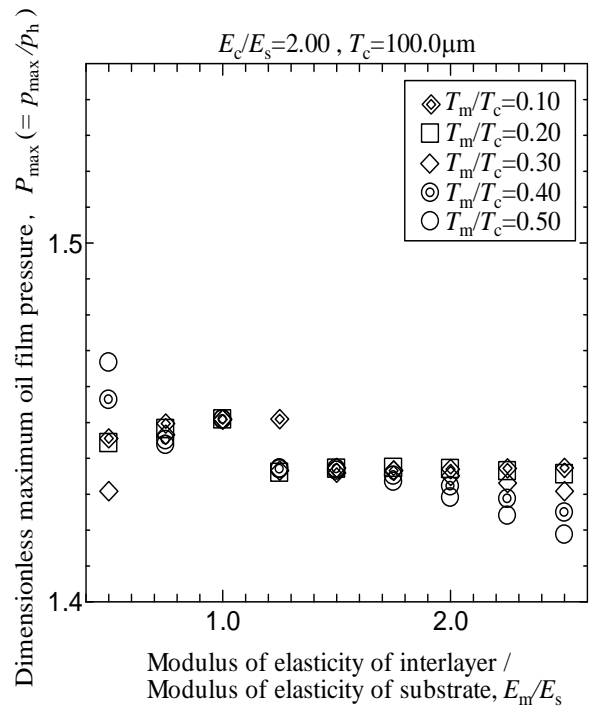
(a) $T_c=25.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$



(b) $T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$

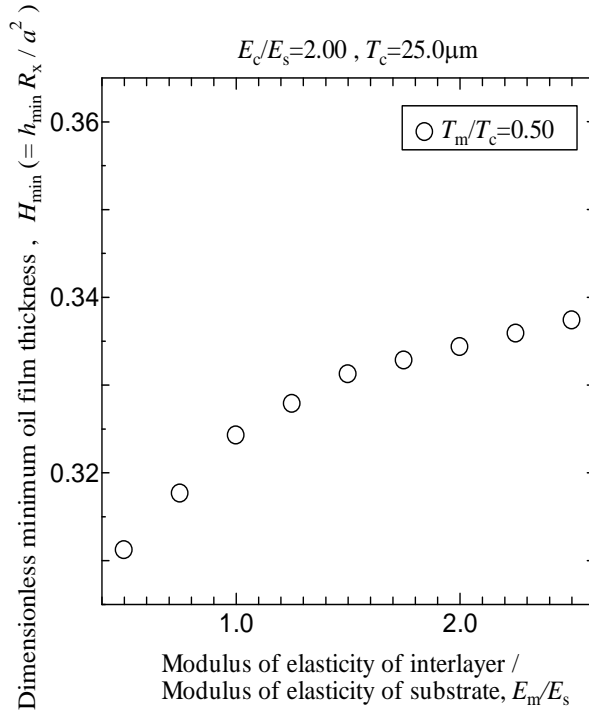


(c) $T_c=75.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$

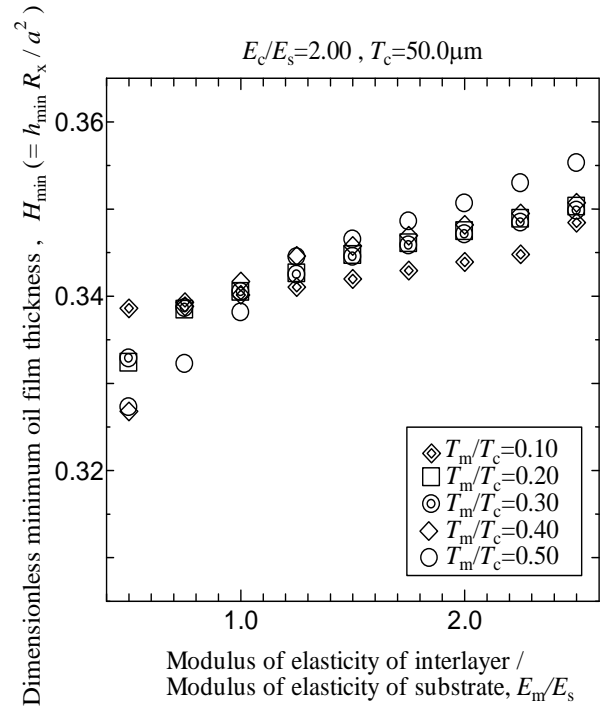


(d) $T_c=100.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$

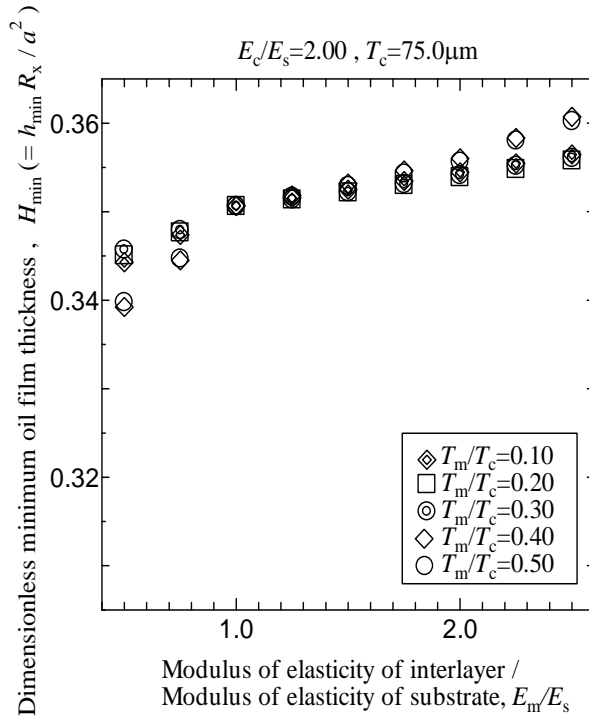
図 4.5 E_m/E_s と P_{\max} の関係



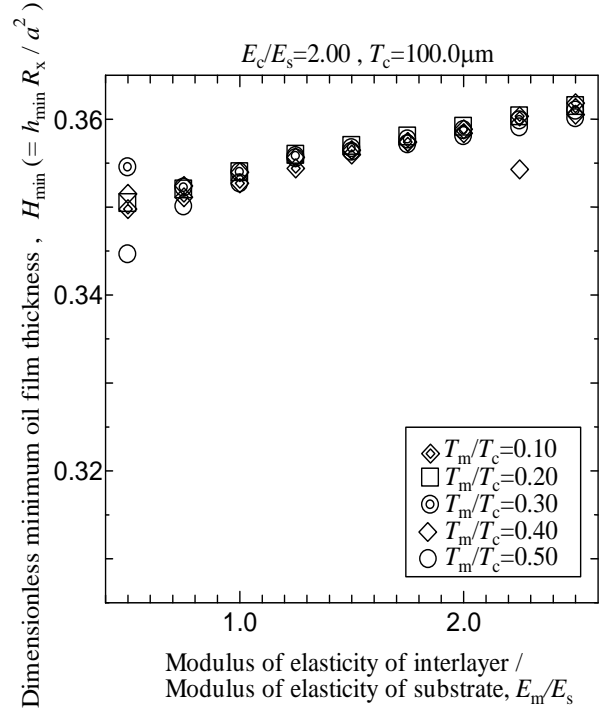
(a) $T_c = 25.0 \mu\text{m}, E_c/E_s = 2.00$



(b) $T_c = 50.0 \mu\text{m}, E_c/E_s = 2.00$

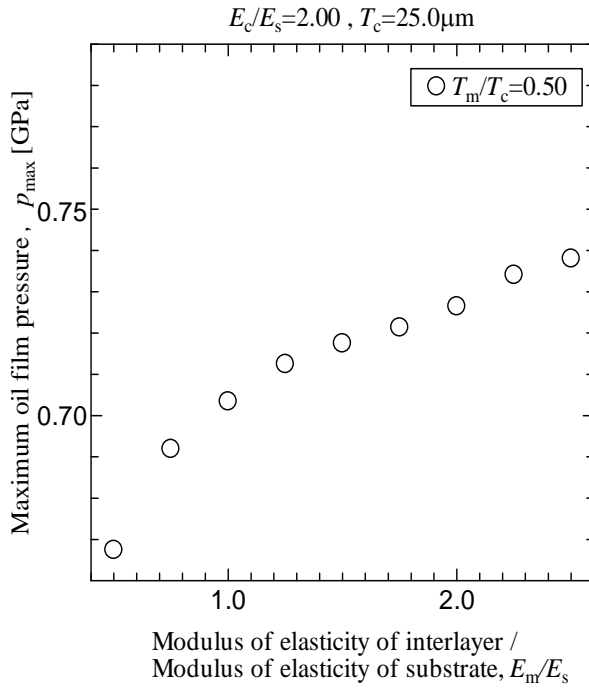


(c) $T_c = 75.0 \mu\text{m}, E_c/E_s = 2.00$

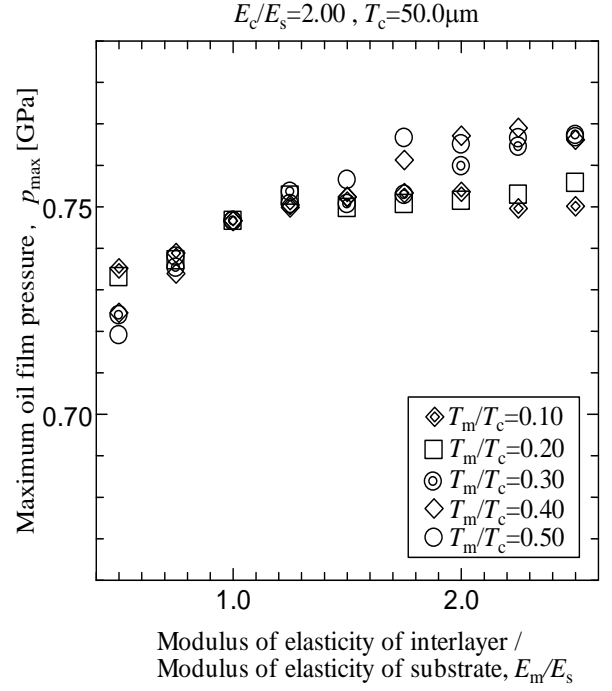


(d) $T_c = 100.0 \mu\text{m}, E_c/E_s = 2.00$

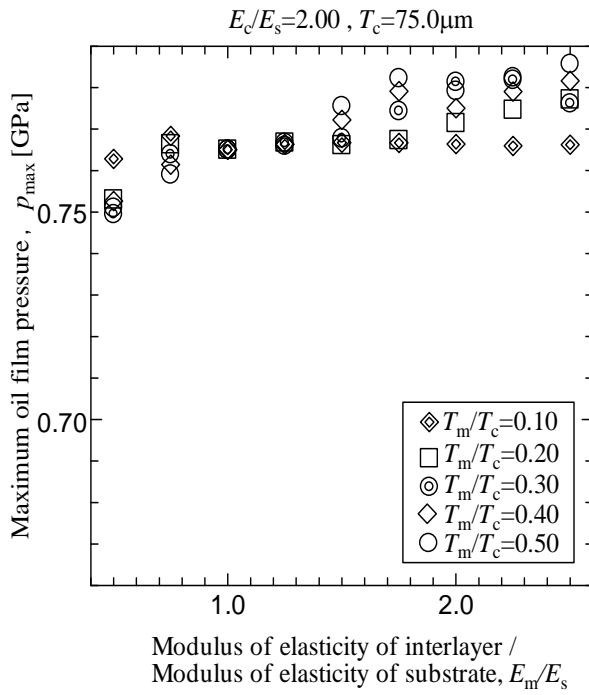
図 4.6 E_m/E_s と H_{\min} の関係



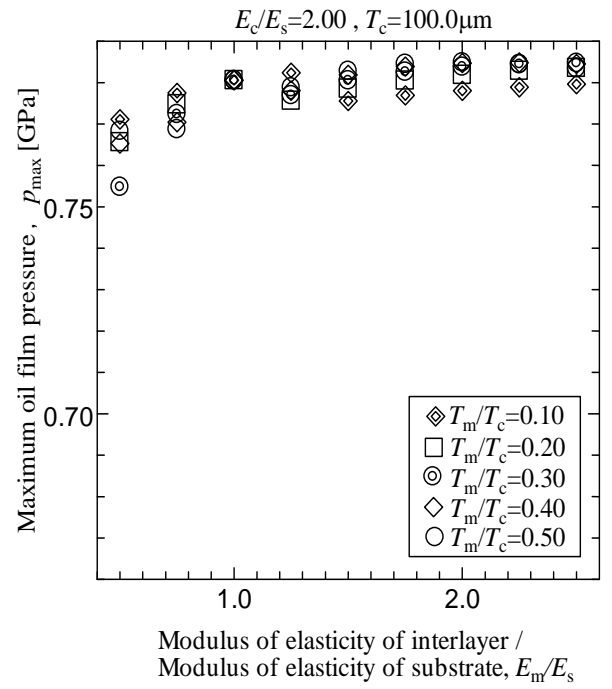
(a) $T_c=25.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$



(b) $T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$

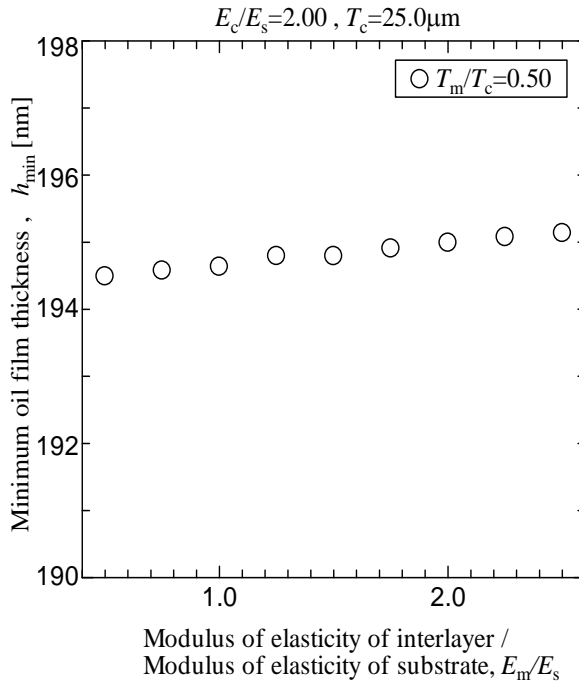


(c) $T_c=75.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$

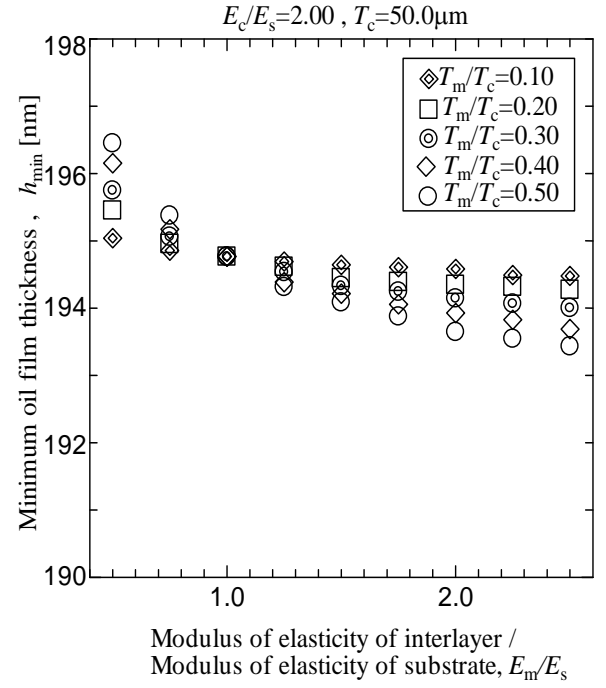


(d) $T_c=100.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$

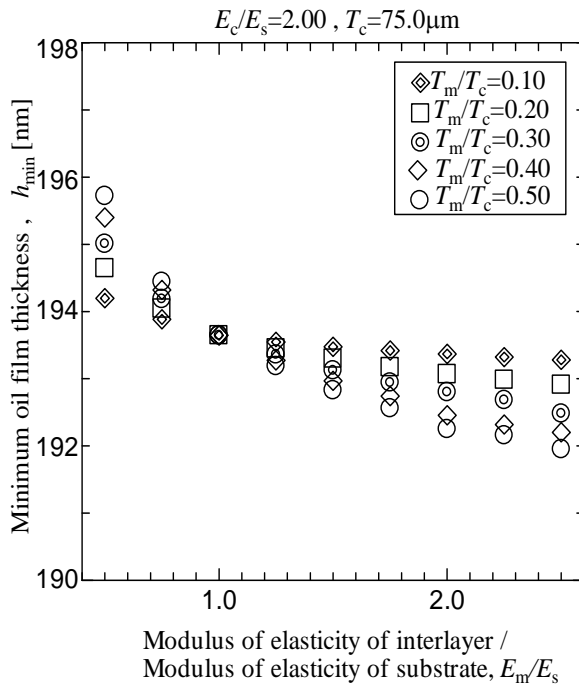
図 4.7 E_m/E_s と p_{max} の関係



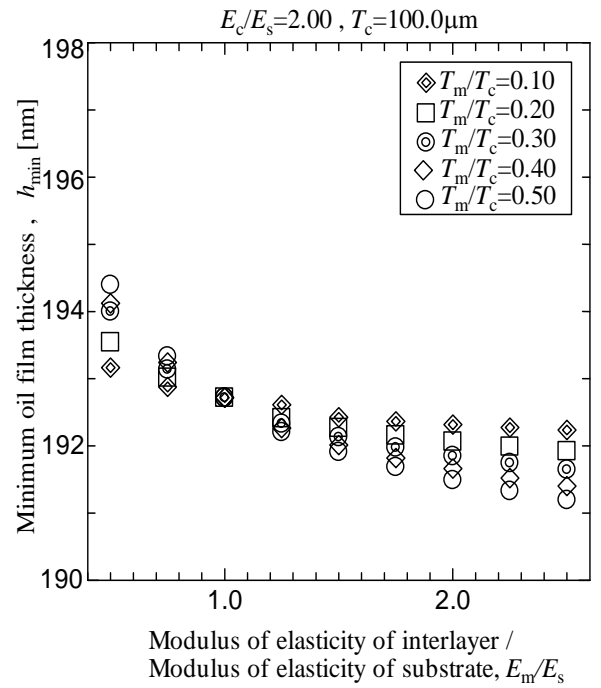
(a) $T_c=25.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$



(b) $T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$



(c) $T_c=75.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$



(d) $T_c=100.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$

図 4.8 E_m/E_s と h_{\min} の関係

(b) 中間層とコーティング膜の厚さ比の影響

図 4.7 および図 4.8 において, p_{\max} および h_{\min} に対する T_m/T_c の影響について解析結果を示し考察を行う.

同一 E_m/E_s で比較をすると, E_m/E_s 値が 1.0 以下の場合, T_m/T_c がより大きいほど, h_{\min} はより大きいものに対して, E_m/E_s 値が 1.0 以上の場合には, その傾向は逆転する. しかしながら p_{\max} に関しては, E_m/E_s の変化および T_m/T_c の変化に対して定性的な傾向を正確には把握できなかった. p_{\max} に関して, 定性的な傾向を正確には把握できない原因について考察を行うために, 図 4.9 に $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=25.0[\mu\text{m}]$, $E_m/E_s=1.25$ の場合で, $E_c/E_s=0.5$ の場合と $E_c/E_s=2.00$ の場合の油膜圧力分布を示す. 縦軸に無次元油膜圧力, 横軸に $Y=0.0$ における X 座標を示す. $E_c/E_s=0.5$ の場合には, B 点における圧力値が p_{\max} となるが, $E_c/E_s=2.0$ の場合には, 圧力スパイクの最大圧力値である A 点が p_{\max} となる. つまり, $E_c/E_s=2.0$ の場合, 圧力スパイク位置で最大圧力値となるので, 計算格子の分割数, 距離により計算精度が左右され, 計算格子のとり方によって最大圧力値の計算誤差が非常に大きくなる. このため, p_{\max} の定性的な傾向が正確には把握できなかった. 計算精度向上のためには, 分割数を増加させ, 計算格子を数多く確保する必要があるが, 計算時間および計算機の性能による制約上, これ以上の分割数増加は困難であると考ええる.

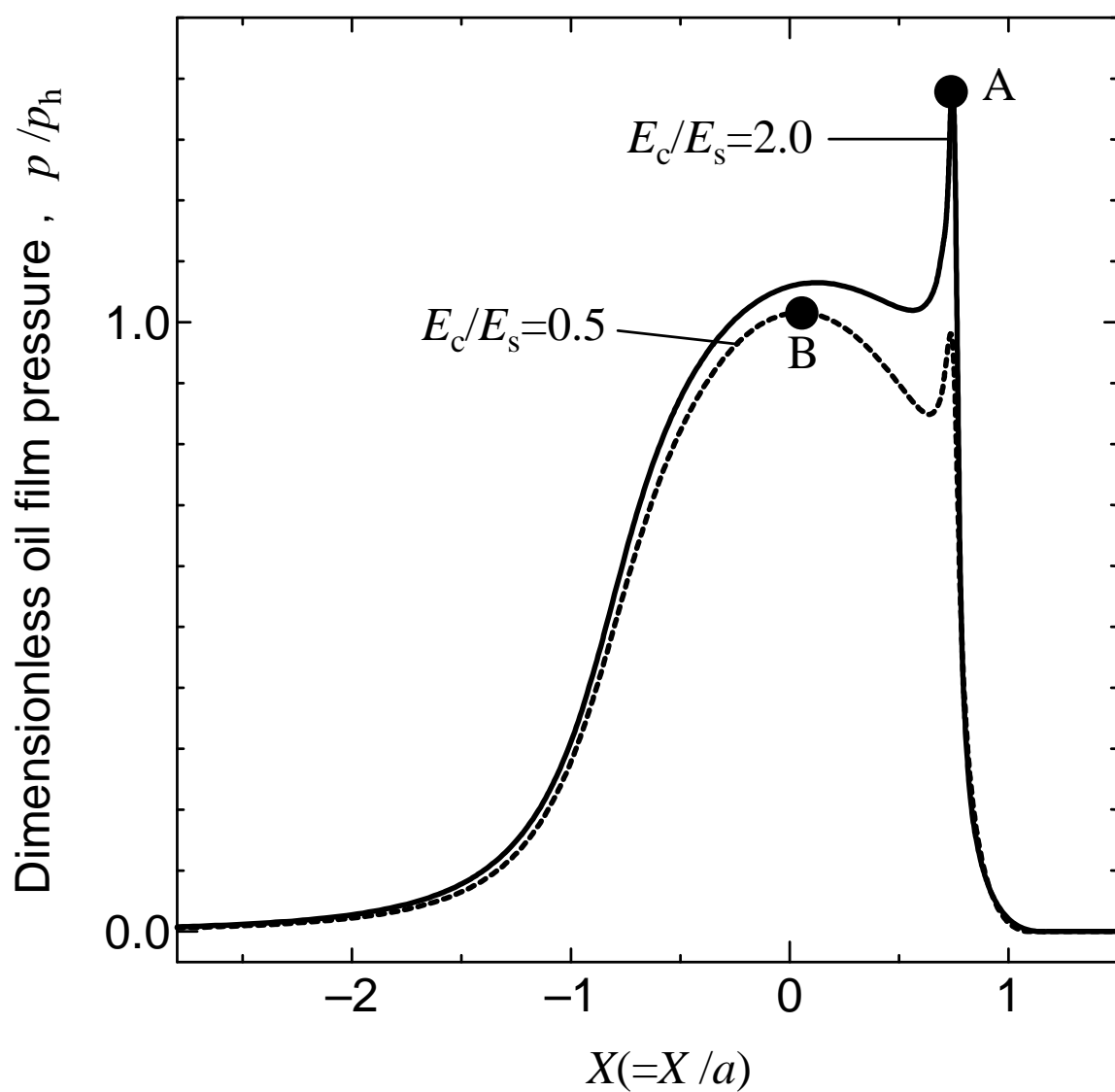


図 4.9 x 軸上の油膜圧力 p の分布 : ($E_m/E_s = 1.25$, $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=25.0[\mu\text{m}]$)

4. 3 内部応力

コーティング膜, 中間層および下地金属内で生じる応力を解析した結果をまとめると以下ようになる.

- (1) 中間層のヤング率および厚さが一定の場合, 材料内部で生じる応力の最大値に対する中間層の影響は, 軟質コーティング膜を施した場合より硬質コーティング膜を施した場合のほうが大きい.
- (2) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜に関わらず, コーティング膜の厚さが一定の場合, 中間層の厚さが大きいほど, 材料内部に生じる応力に与える影響は大きい.
- (3) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜に関わらず, 中間層のヤング率がより大きくなると, コーティング膜の厚さが比較的薄い場合には材料内部で生じる von Mises 応力の最大値は計算された条件の範囲内で最小値を生じる. 一方, コーティング膜の厚さが比較的厚い場合には von Mises 応力の最大値はほとんど変化しない.
- (4) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜に関わらず, コーティング膜の厚さが比較的薄い場合には中間層を施すと, von Mises 応力の最大値は中間層がない場合と比較して大きくなる場合があるが, コーティング膜の厚さが比較的厚い場合には中間層の有無に関係なく材料内部で生じる von Mises 応力の最大値はほとんど変化しない.
- (5) 軟質コーティング膜を施した場合, コーティング膜の厚さが比較的薄い場合には, 中間層の厚さを大きくすると, von Mises 応力の最大値が生じる位置は, 中間層と下地金属との界面付近に移動する. 一方, コーティング膜の厚さが比較的厚い場合には, 中間層の厚さに関係なく von Mises 応力の最大値は中間層内部で生じる.
- (6) 硬質コーティング膜を施した場合には, コーティング膜の厚さが比較的薄い場合には, von Mises 応力の最大値はコーティング膜, 中間層および下地金属のうちヤング率が一番高い材料の内部で生じる. 一方, コーティング膜の厚さが比較的厚い場合には, von Mises 応力の最大値はコーティング膜内で生じ移動しない.

以下にその詳細を述べるとともに考察を行う.

4. 3. 1 軟質コーティング膜の場合 ($E_c/E_s=0.5$ の場合)

付表 4.1~付表 4.10 は, $E_c/E_s=0.5$ の場合における最大せん断応力の最大値と von Mises 応力の最大値を無次元した値とその発生位置についての解析結果を示す. 付表 4.1~付表 4.10 中の Z_c はコーティング膜と中間層の界面の Z 座標, Z_m は中間層と下地金属の界面の Z 座標を無次元表示したものである. T_c , T_m , E_c/E_s および E_m/E_s に関わらず, どの計算条件においても $\sigma_{x\text{-max}}/p_h$, $\sigma_{y\text{-max}}/p_h$, $\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ と $\tau_{xy\text{-max}}/p_h$

はコーティング膜表面で生じているのに対して、 $\tau_{yz\text{-max}}/p_h$, $\tau_{zx\text{-max}}/p_h$, $\tau_{\text{max-max}}/p_h$ および $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はコーティング膜内、中間層内もしくは下地金属内で生じ、その位置はコーティング膜材のヤング率および厚さにより変化する。この傾向はコーティング膜が一層施された場合と同様である。

本節においても 3. 4 節と同様に、ミーゼスの降伏条件を基にコーティング膜、中間層および下地金属内で生じる応力を評価する。従って、von Mises 応力 σ_{mise} の解析結果を中心に述べ考察を行う。

図 4.10～図 4.17 は、 E_m/E_s と無次元化された各応力の最大値との関係を示す。図 4.10～図 4.15 の縦軸は各応力の最大値を絶対値で表示している。

(a) 中間層と下地金属のヤング率比の影響

図 4.10～図 4.17 において最大応力値に対する E_m/E_s の影響について考察を行う。

$T_c=50.0[\mu\text{m}]$ で比較すると E_m/E_s がより大きいほど、 $\sigma_{x\text{-max}}/p_h$, $\sigma_{y\text{-max}}/p_h$, $\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ はより小さくなる傾向にある。これは E_m/E_s がより大きいほど、図 4.1 に示されるようにコーティング膜表面への作用外力となる P_{max} がより小さくなるために生じると考える。しかしながら、 $\tau_{xy\text{-max}}/p_h$, $\tau_{yz\text{-max}}/p_h$, $\tau_{zx\text{-max}}/p_h$, $\tau_{\text{max-max}}/p_h$ および $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は計算された条件の範囲内で最小値を示す傾向となる。

次に、 T_c を変化させた場合の $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ に着目すると、 $T_c=25.0[\mu\text{m}]$ の場合には、 E_m/E_s がより大きくなると $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はより大きくなる。しかしながら $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ の場合には、 $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は、 E_m/E_s の増加とともに大きく変化し、 $E_m/E_s=0.50\sim 1.00$ 付近で最小値をもつ。すなわち、中間層のヤング率 E_m が、コーティング膜のヤング率 E_c と下地金属のヤング率 E_s との間にあるときに $\sigma_{\text{mises-max}}$ が最も小さくなる。さらに T_c がより大きくなると $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ の変化は小さくなり、 $T_c=100.0[\mu\text{m}]$ の場合には、 $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はほとんど変化しない。 E_m/E_s 値が 1.0、すなわち中間層のヤング率と下地金属のヤング率が同じ場合には、中間層がなく下地金属上に軟質コーティング膜が一層施された場合として考えることができる。 $E_m/E_s=1.0$ の場合の応力と比較すると、 $T_c=25.0[\mu\text{m}]$, $50.0[\mu\text{m}]$ および $75.0[\mu\text{m}]$ の場合には、図 4.17(a), (b), (c) に示すように E_m/E_s 値が 1.0 以外の場合に $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は大きくなる。一方、 T_c 値が $100.0[\mu\text{m}]$ の場合には、図 4.17(d) に示すように $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は変化しない。従って、 T_c が比較的小さい場合には、中間層を施すと材料内部で生じる $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は大きくなる場合があるのに対して、 T_c が大きい場合には、中間層を施しても $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は変化しない。これらの現象は T_c , T_m および E_m/E_s によってコーティング膜、中間層および下地金属の内部で生じる応力の分布が変化し、応力の高い領域が集中もしくは分散するために生じると考える。以下にその応力分布の定性的傾向の詳細について述べる。

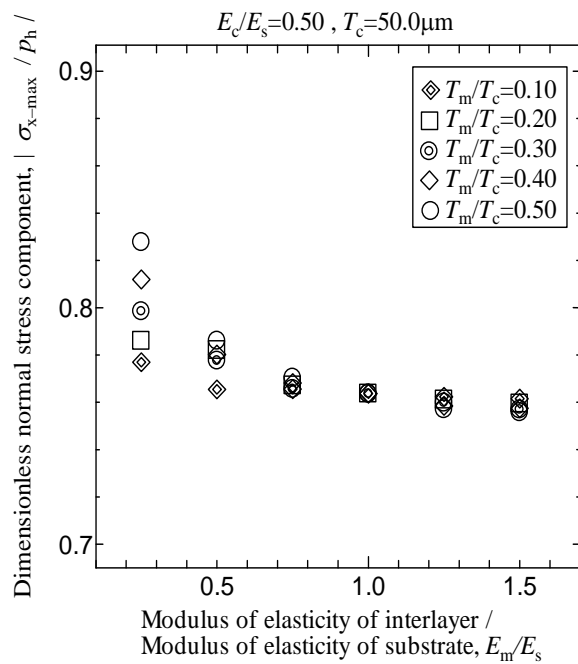


図 4.10 E_m/E_s と σ_x の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

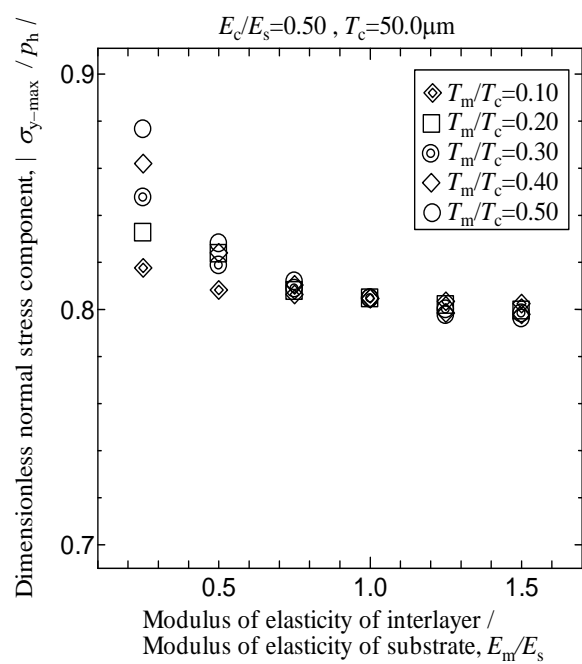


図 4.11 E_m/E_s と σ_y の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

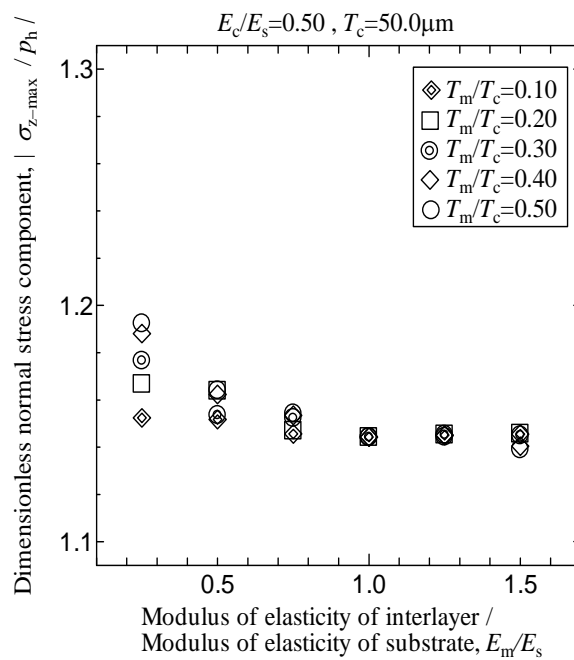


図 4.12 E_m/E_s と σ_z の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

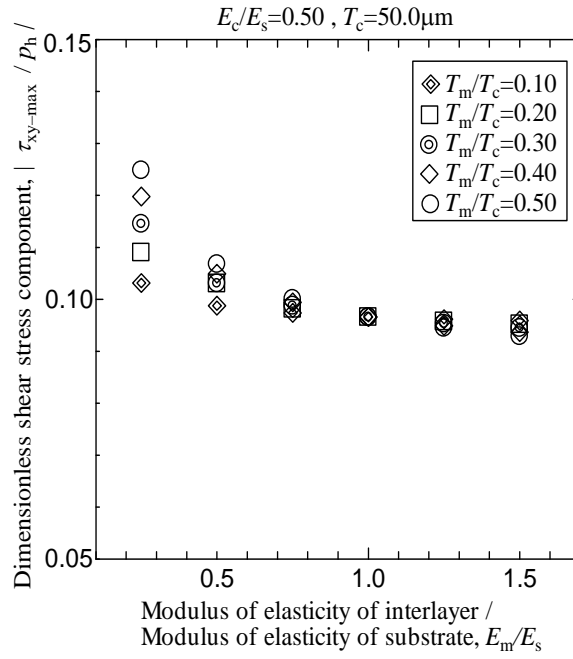


図 4.13 E_m/E_s と τ_{xy} の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

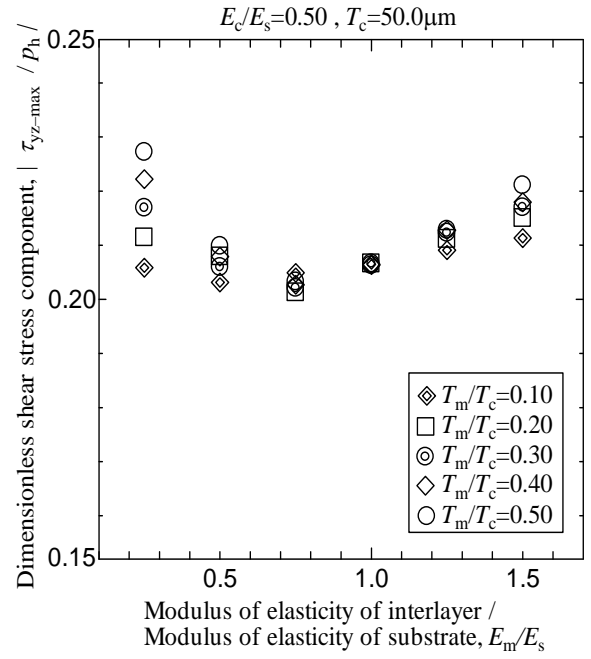


図 4.14 E_m/E_s と τ_{yz} の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

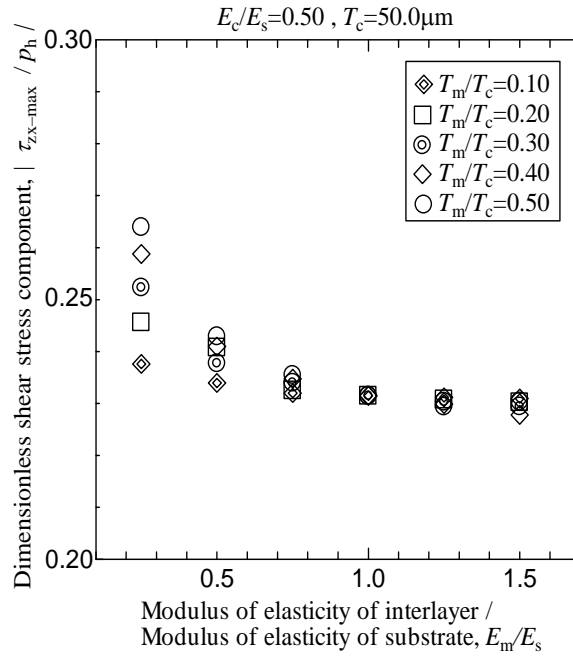


図 4.15 E_m/E_s と τ_{zx} の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

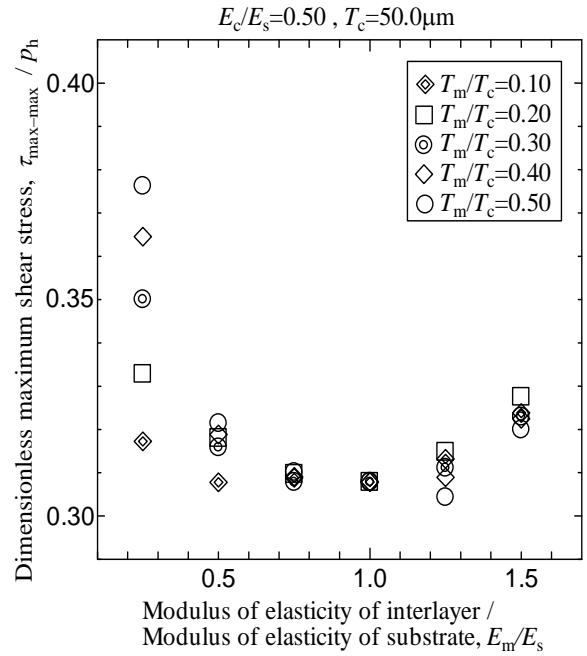
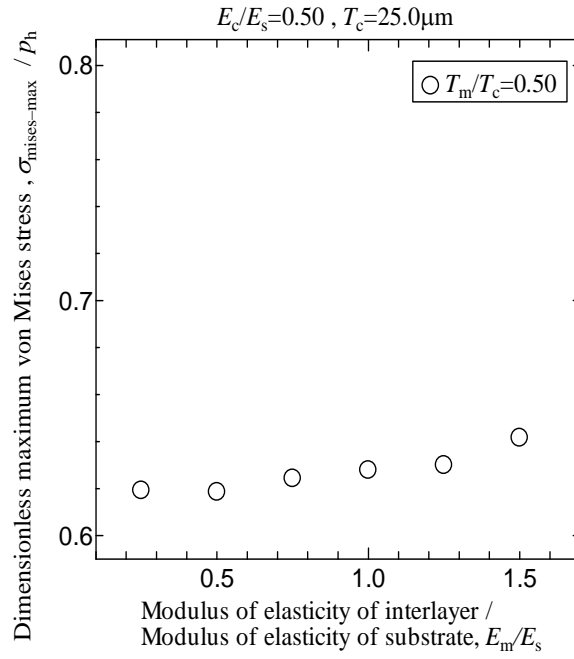
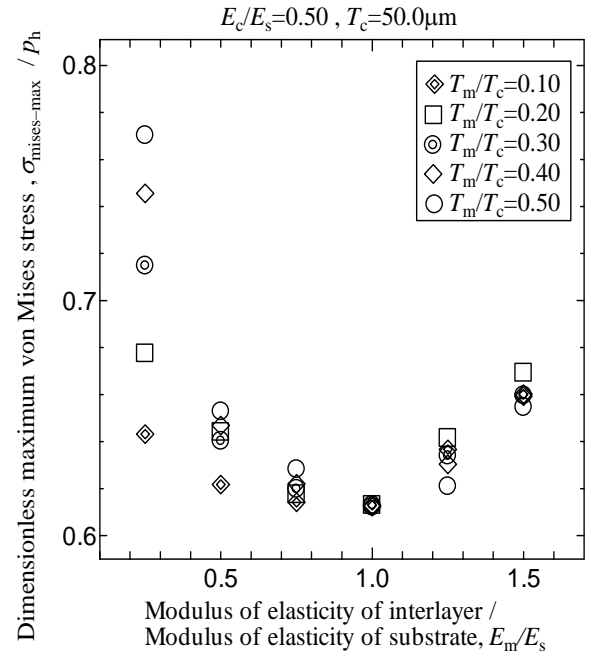


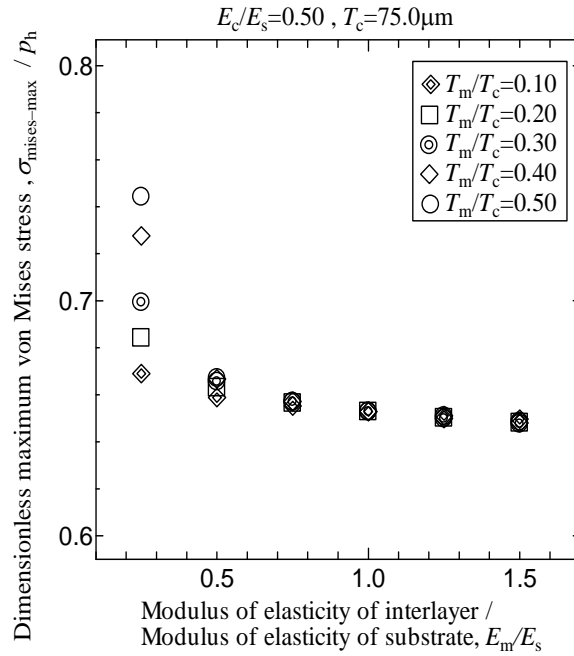
図 4.16 E_m/E_s と τ_{\max} の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)



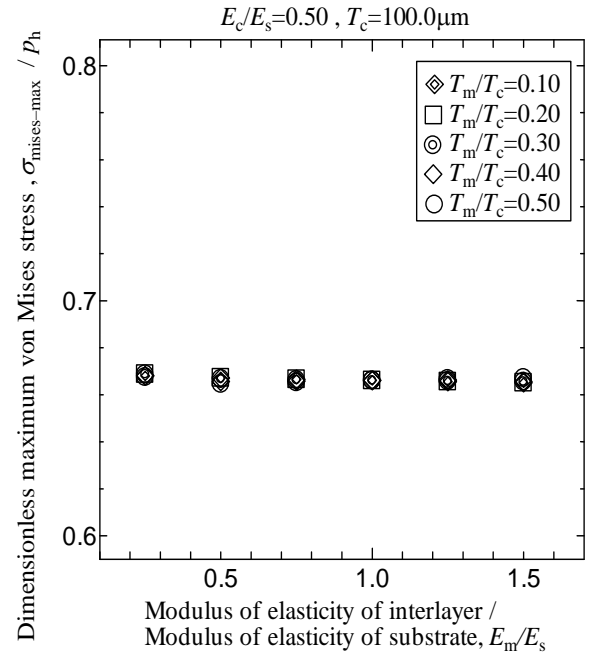
(a) $T_c=25.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$



(b) $T_c=50.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$



(c) $T_c=75.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$



(d) $T_c=100.0\mu\text{m}, E_c/E_s=0.50$

図 4.17 E_m/E_s と $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ の関係

図 4.18(a), (b)～図 4.28(a), (b)に、 X - Z 断面および Y - Z 断面上における $\sigma_{\text{mises}}/p_h$ の分布を示す。同図において、横軸 X 方向は潤滑油の流れる方向、 Y 方向は X 軸に対して垂直な方向、縦軸 Z 方向はコーティング膜、中間層および下地金属の深さ方向をそれぞれ示し、 X 座標、 Y 座標および Z 座標はそれぞれヘルツ接触半幅 a で無次元化されている。 $Z=0.0$ は潤滑面を示し、 $X=0.0$ は接触中心を示す。また図中の \times 印は $\sigma_{\text{mises}}/p_h$ の最大値 $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ が生じている位置を示す。

図 4.27 は、 E_m/E_s 値が 1.0、すなわち中間層と下地金属のヤング率が等しいので、中間層がなく下地金属上に $T_c=100.0[\mu\text{m}]$ のコーティング膜が一層施された場合の応力分布を示している。同図より応力の高い領域はコーティング膜内に集中しており $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ が生じる。これに対して $T_c=100.0[\mu\text{m}]$ のコーティング膜と下地金属との間に $T_m=50.0[\mu\text{m}]$ の中間層を施した場合、図 4.25、図 4.26 および図 4.28 に示されるように E_m/E_s に関わらず比較的応力の高い領域は、中間層がない場合と同様にコーティング膜内に集中しており $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ が生じる。従って、図 4.17(d)に示すように中間層の有無および E_m/E_s の値に関わらず $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の変化量は非常に小さいと考える。

$T_c=50.0[\mu\text{m}]$ 、 $T_m=25.0[\mu\text{m}]$ の場合、図 4.21～図 4.25 に示すように、 $E_m/E_s=0.25$ では比較的応力の高い領域は、コーティング膜と中間層との界面付近に集中し $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ が生じているのに対して、 $E_m/E_s=1.25$ では、応力が高い領域は、コーティング膜と中間層に分散し中間層内で $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は生じる。その結果、 $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は小さくなる。さらに $E_m/E_s=2.00$ では、応力が高い領域は、中間層と下地金属との界面付近に集中し $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ が生じる。従って、図 4.17(b)に示すように、 $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は最小値をもつと考える。

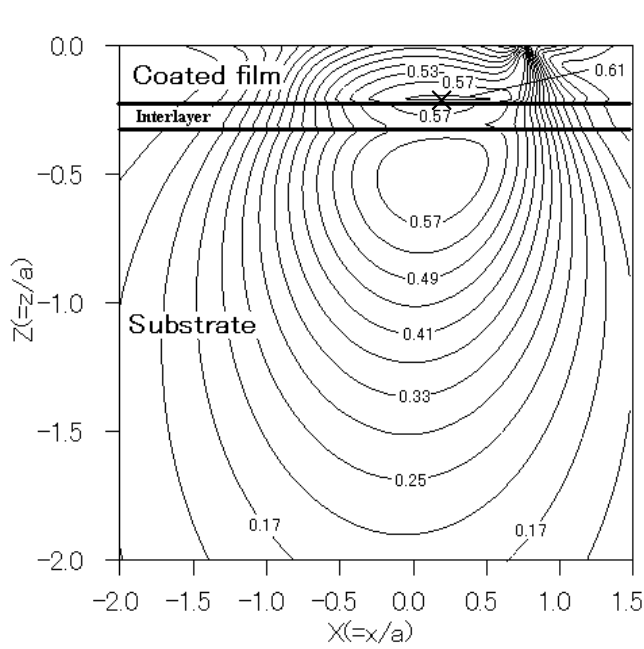
$T_c=25.0[\mu\text{m}]$ 、 $T_m=12.5[\mu\text{m}]$ の場合、図 4.18～図 4.20 に示すように、 $E_m/E_s=0.25$ では、比較的応力が高い領域は、コーティング膜と中間層との界面付近と下地金属内に分散し、中間層内で $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は生じるのに対して、 $E_m/E_s=0.75$ の場合には、応力が高い領域は下地金属内に集中し $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は生じ、 $E_m/E_s=1.50$ の場合には、中間層内に集中し $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は生じる。従って、図 4.17(a)に示すように、 E_m/E_s の増加に伴って $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ はより大きくなると考える。

このように E_c 、 E_m 、 E_s の相対的大小により $\sigma_{\text{mises}}/p_h$ の分布および応力値が変化した結果、図 4.17(a)～(d)に示すように $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は変化すると考える。

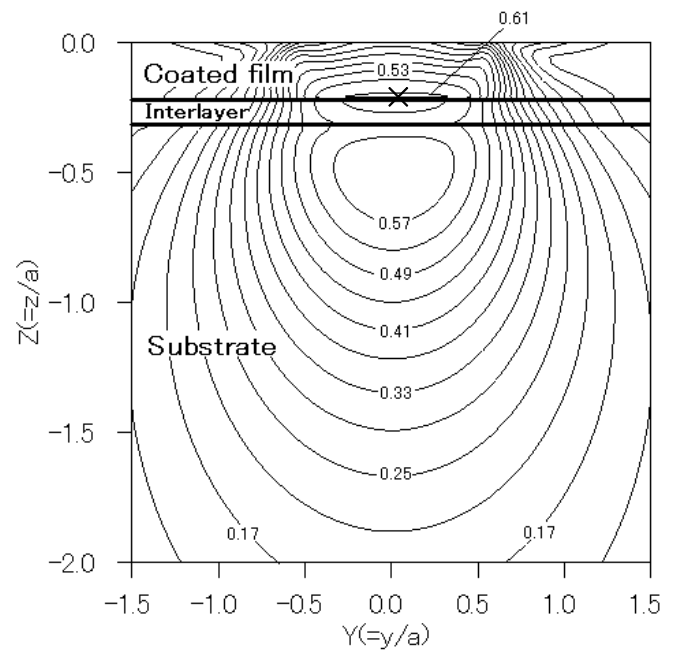
(b) 中間層とコーティング膜の厚さ比の影響

図 4.10～図 4.17 において最大応力値に対する T_m/T_c の影響について考察を行う。

$T_c=50.0[\mu\text{m}]$ 一定とし、同一 E_m/E_s で比較した場合、 T_m/T_c がより大きくなると各応力の最大値の変化量はより大きくなる傾向がある。従って、中間層が厚いほど、各応力の最大値に与える影響が大きくなる。また E_m/E_s 値が 1.0 以下の場合には、 T_m がより大きいほど、コーティング膜表面への作用外力となる P_{max} がより小さく

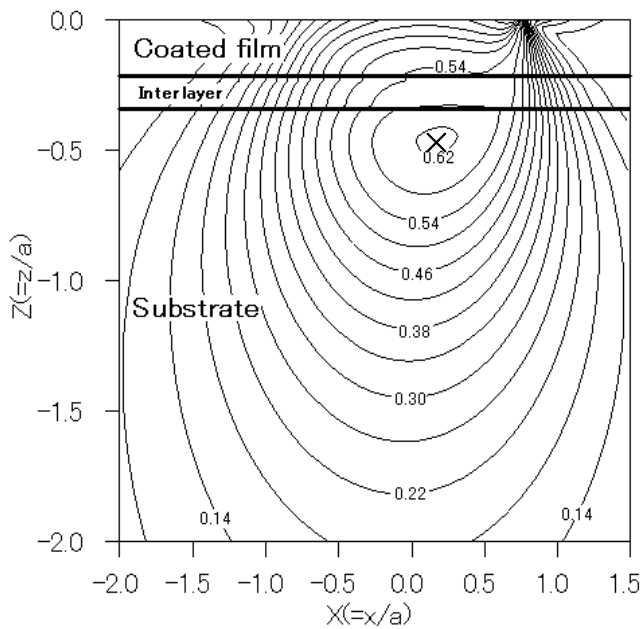


(a) X-Z 平面の分布図

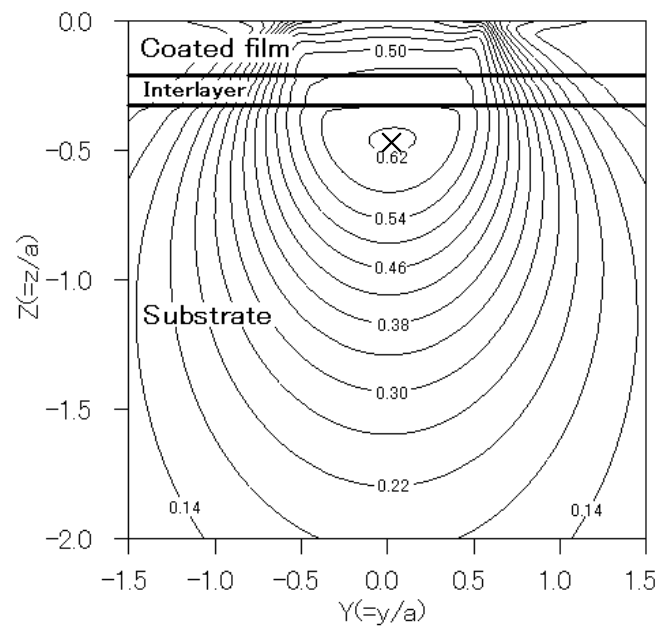


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.18 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=25.0[\mu\text{m}]$, $T_m=12.5[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.25$

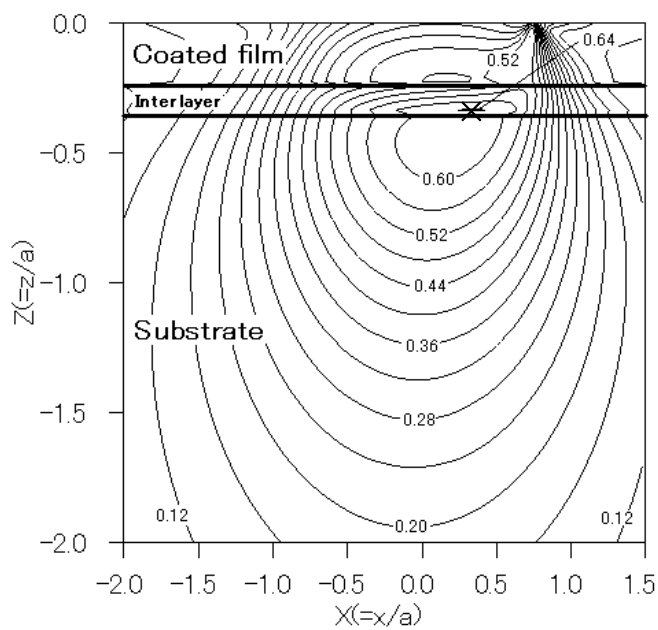


(a) X-Z 平面の分布図

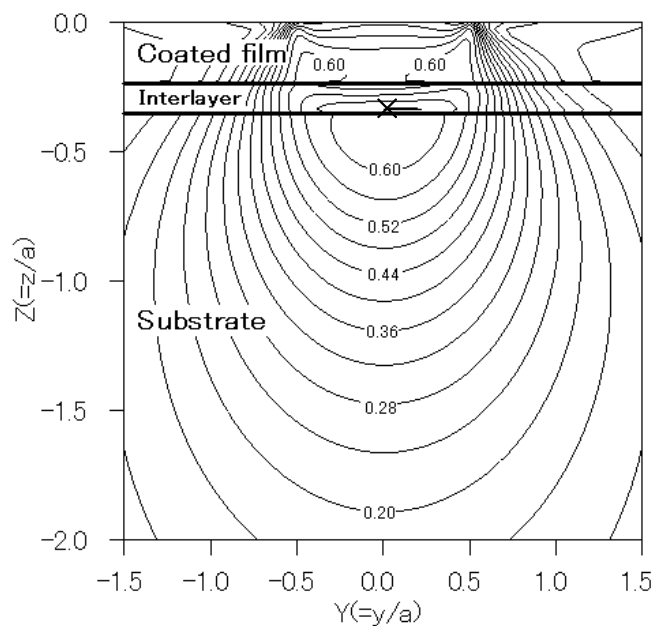


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.19 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=25.0[\mu\text{m}]$, $T_m=12.5[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.75$

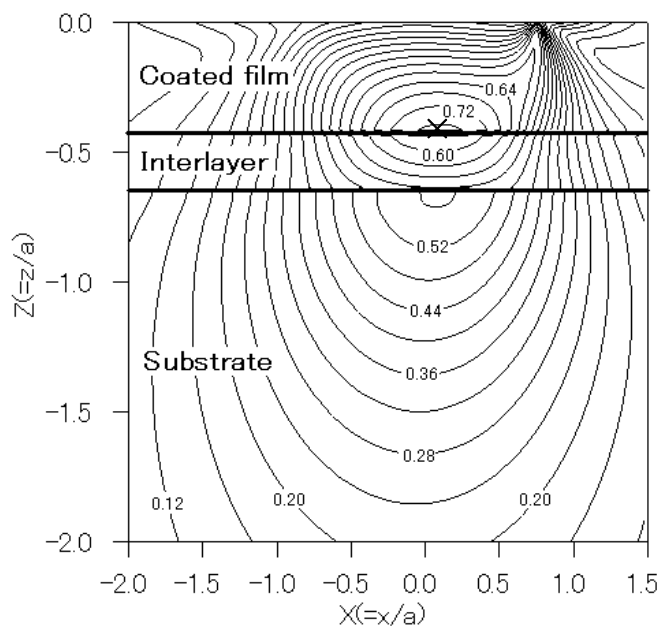


(a) X-Z 平面の分布図

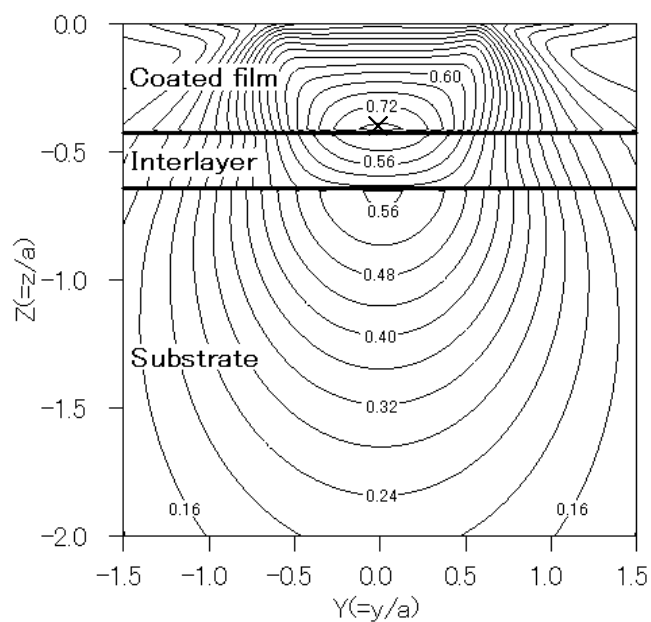


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.20 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=25.0[\mu\text{m}]$, $T_m=12.5[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=1.50$

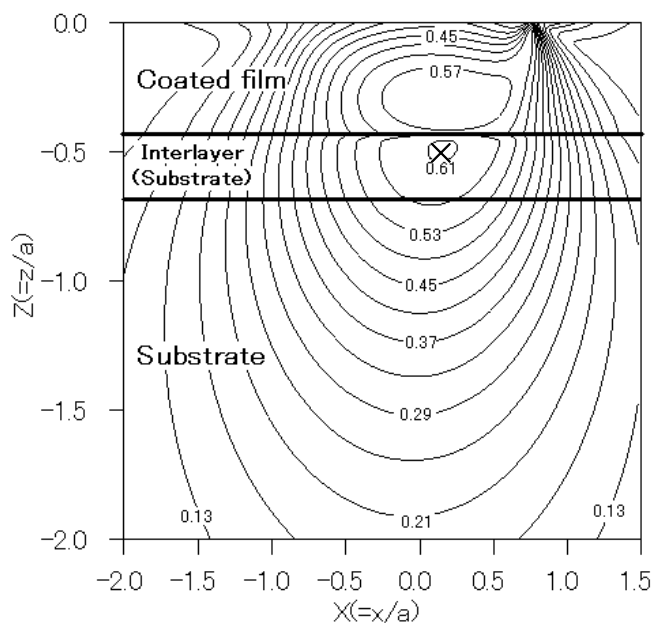


(a) X-Z 平面の分布図

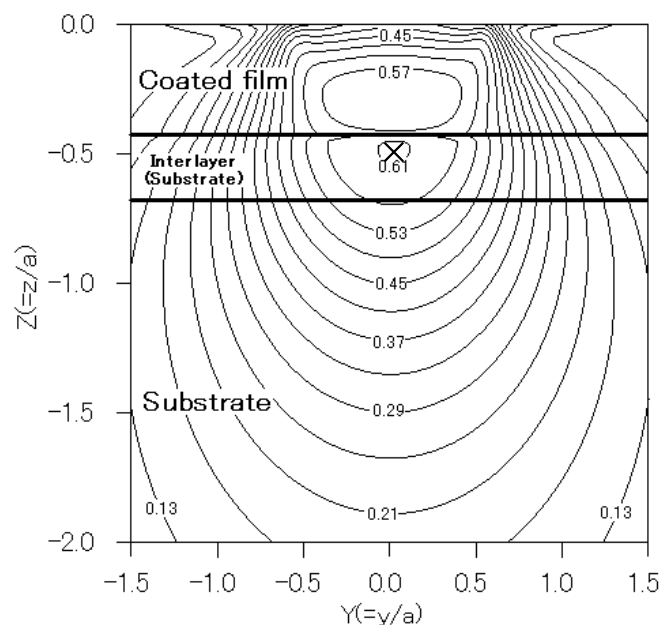


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.21 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=25.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.25$

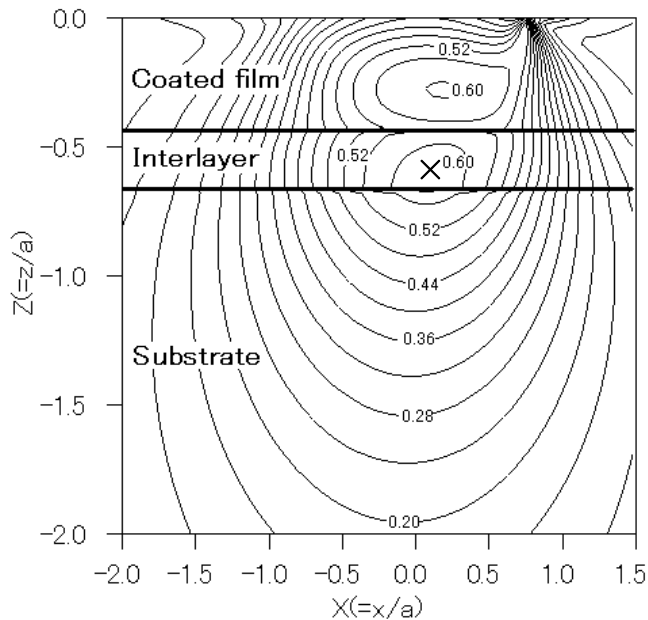


(a) X-Z 平面の分布図

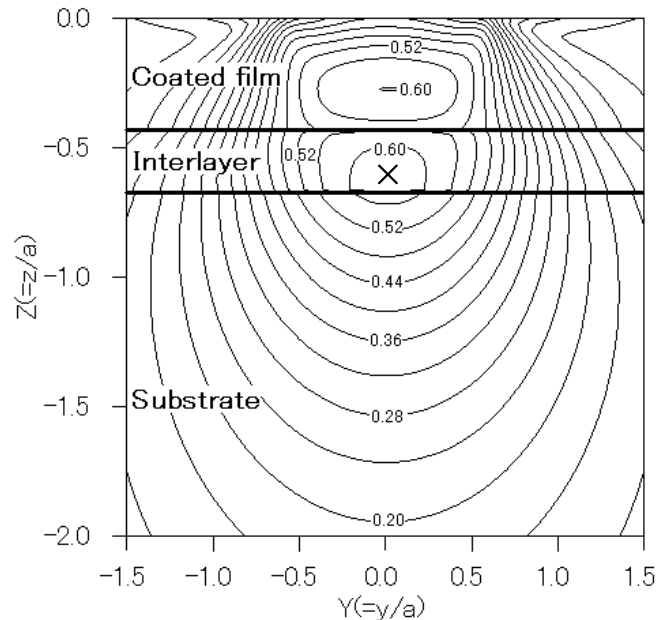


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.22 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=25.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=1.00$

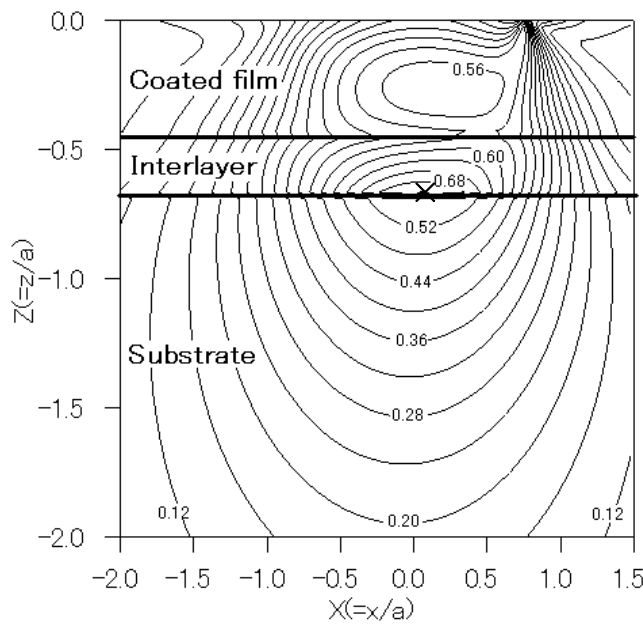


(a) X-Z 平面の分布図

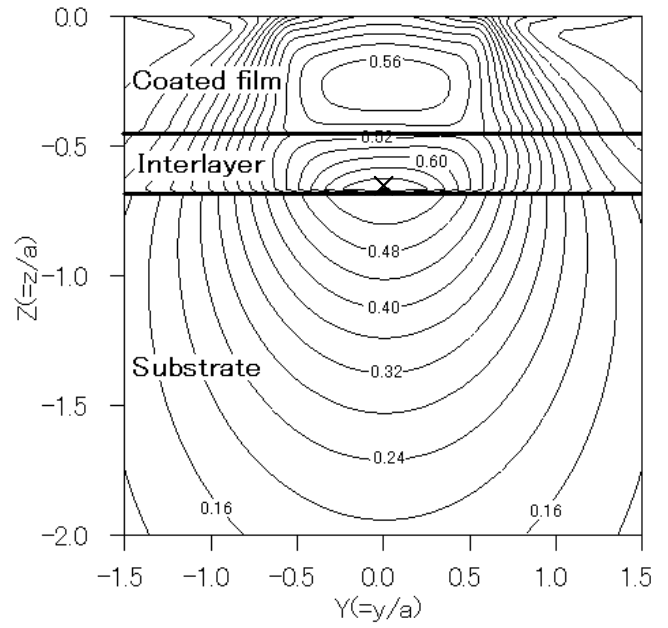


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.23 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=25.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=1.25$

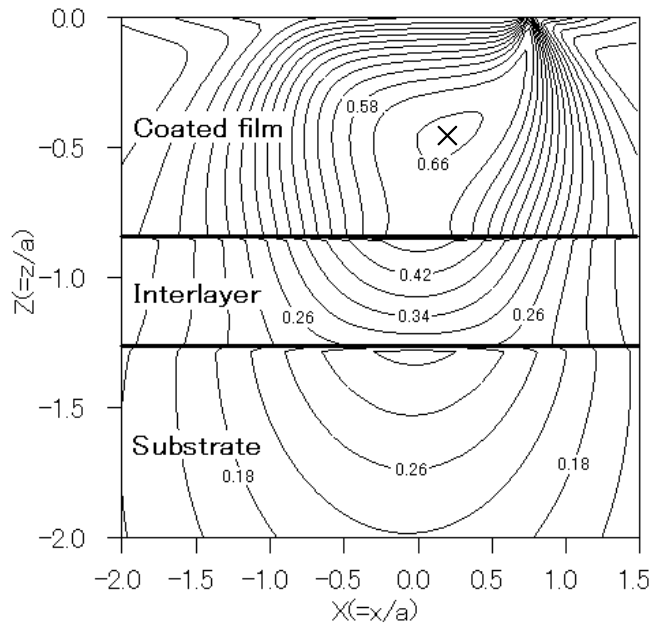


(a) X-Z 平面の分布図

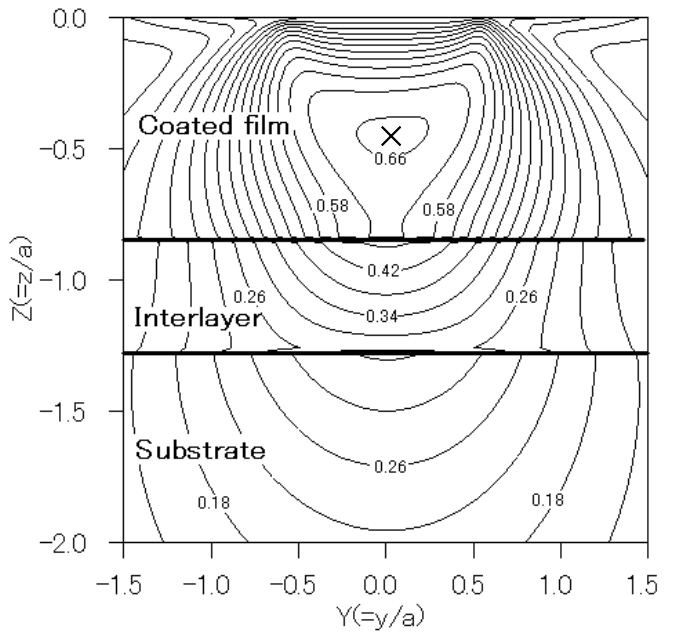


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.24 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=25.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=2.00$

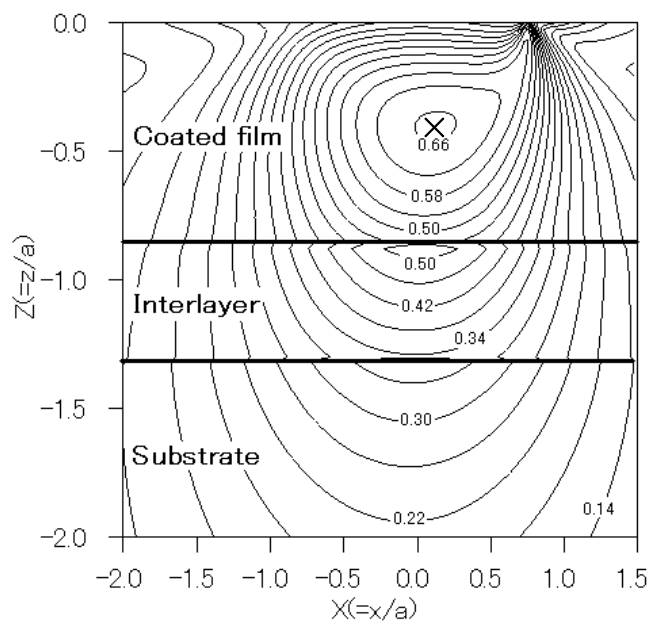


(a) X-Z 平面の分布図

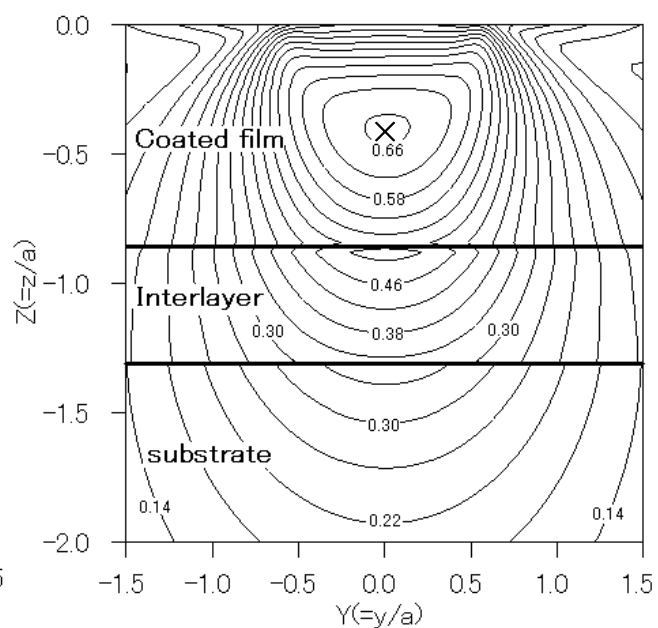


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.25 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=100.0[\mu\text{m}]$, $T_m=50.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.25$

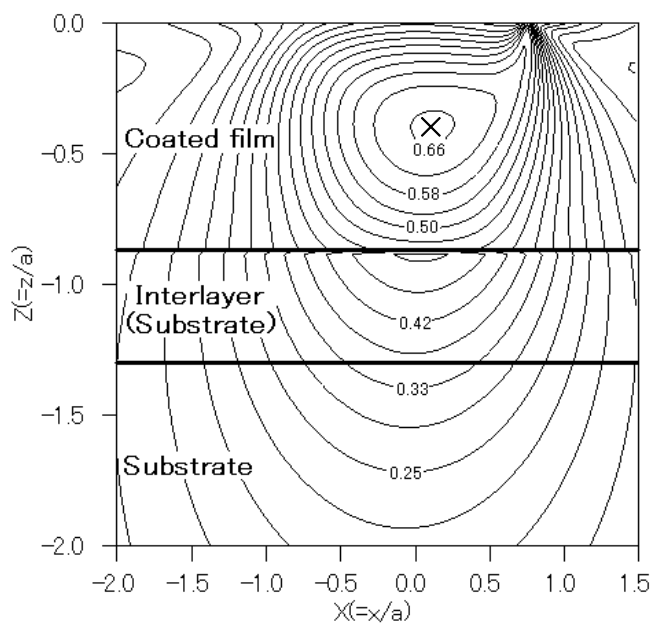


(a) X-Z 平面の分布図

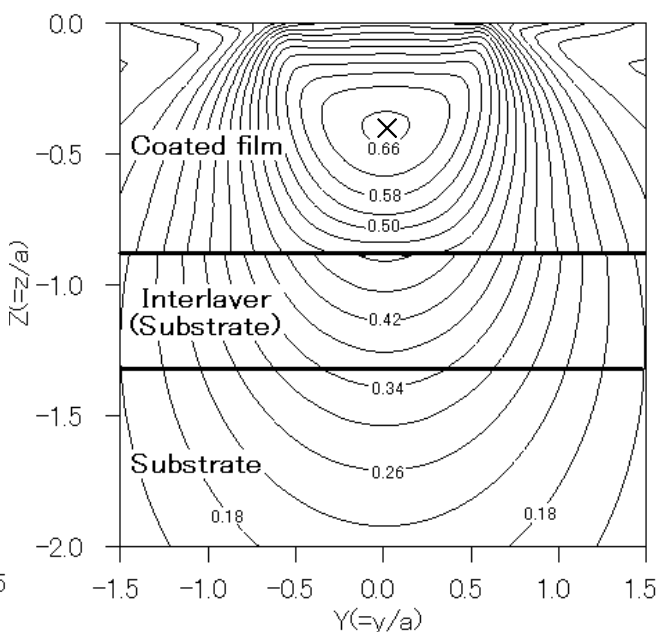


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.26 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=100.0[\mu\text{m}]$, $T_m=50.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.75$

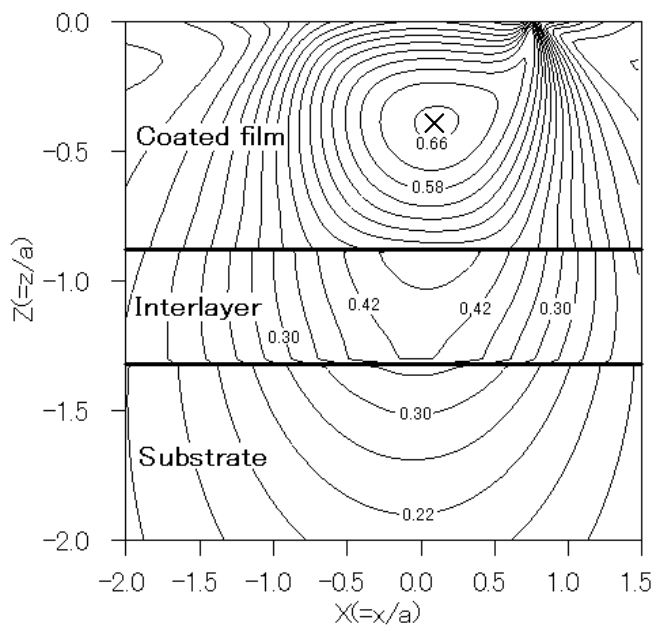


(a) X-Z 平面の分布図

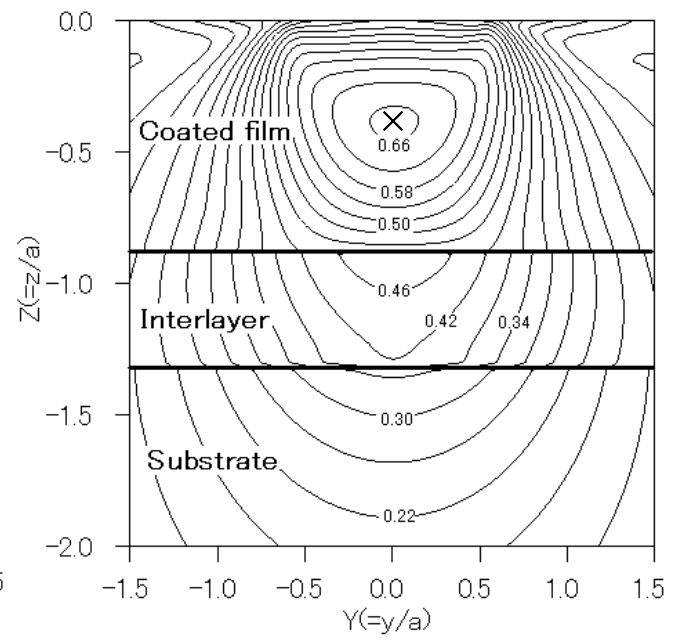


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.27 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=100.0[\mu\text{m}]$, $T_m=50.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=1.00$



(a) X-Z 平面の分布図



(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.28 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=100.0[\mu\text{m}]$, $T_m=50.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=1.50$

なるので、 $\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ 、 $\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ 、 $\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ および $\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ はより小さくなる。一方、 E_m/E_s 値が 1.0 以上の場合には、 T_m がより大きいほど、 P_{max} がより大きくなるので、 $\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ 、 $\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ 、 $\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ および $\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ はより大きくなる。しかしながら、 $\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ 、 $\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ 、 $\tau_{\text{max-max}}/p_h$ および $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は、 T_m の変化に伴って、コーティング膜、中間層および下地金属の内部で生じる応力の分布が変化するために定性的な傾向を示さない。

次に、 T_c を変化させた場合の $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ に着目する。付表 4.1～付表 4.5 中の $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ が生じている Z 座標と Z_c および Z_m を比較すると、 $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ の場合 T_m の値に関わらず、コーティング膜および中間層内で $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ が生じる。また同一 E_m/E_s で比較すると、 T_m がより大きくなると $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ が生じる位置は、 Z_m すなわち中間層と下地金属の界面により近い位置に移動する。これらの現象は、同一 E_m/E_s で比較すると、 T_m がより大きくなると中間層の性質がコーティング膜の性質および下地金属の性質に対して支配的となり、最大応力値およびその発生位置に対する中間層の影響がより大きくなるために生じると考える。一方、付表 4.6～付表 4.10 より、 $T_c=100[\mu\text{m}]$ 、 $T_m=10.0\sim 50.0[\mu\text{m}]$ の場合には、 T_m が変化しても $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はコーティング膜内で生じ、その位置は変化しない。これは、 T_c が比較的大きい場合には、コーティング膜の性質が中間層および下地金属の性質に対して支配的であるために生じると考える。

4. 3. 2 硬質コーティング膜の場合 ($E_c/E_s=2.00$ の場合)

付表 4.11～付表 4.15 は、 $E_c/E_s=2.00$ の場合における各応力の最大値を無次元した値とその発生位置についての解析結果を示す。 $E_c/E_s=0.50$ の場合と同様に T_c 、 T_m 、 E_c/E_s および E_m/E_s の値に関わらず、どの計算条件においても $\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ 、 $\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ 、 $\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ と $\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ はコーティング膜表面で生じているのに対して、 $\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ 、 $\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ 、 $\tau_{\text{max-max}}/p_h$ および $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はコーティング膜内、中間層内もしくは下地金属内で生じ、その位置はコーティング膜材のヤング率および厚さにより変化する。

(a) 中間層と下地金属のヤング率比の影響

図 4.29～図 4.36 は、 E_m/E_s と無次元化された各応力の最大値との関係を示す。図 4.29～図 4.36 において最大応力値に対する E_m/E_s の影響について考察を行う。

$T_c=50.0[\mu\text{m}]$ で比較すると E_m/E_s がより大きいほど、 $\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ 、 $\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ 、 $\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ 、 $\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ 、 $\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ 、 $\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ および $\tau_{\text{max-max}}/p_h$ は小さくなり、 $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は計算された条件の範囲内で最小値を示す傾向となる。また、 $E_c/E_s=0.5$ の場合における各応力の最大値を示した図 4.10～図 4.17 と $E_c/E_s=2.0$ の場合における各応力の最大値を示した図 4.29～図 4.36 を比較すると、同一 T_m/T_c の場合、 E_m/E_s の変化に対する各応力の最大値の変化は、 $E_c/E_s=0.5$ の場合における各応力の最大値の変化より大きい。従って、軟質コーティング膜を施した場合より硬質コーティング膜を施した場

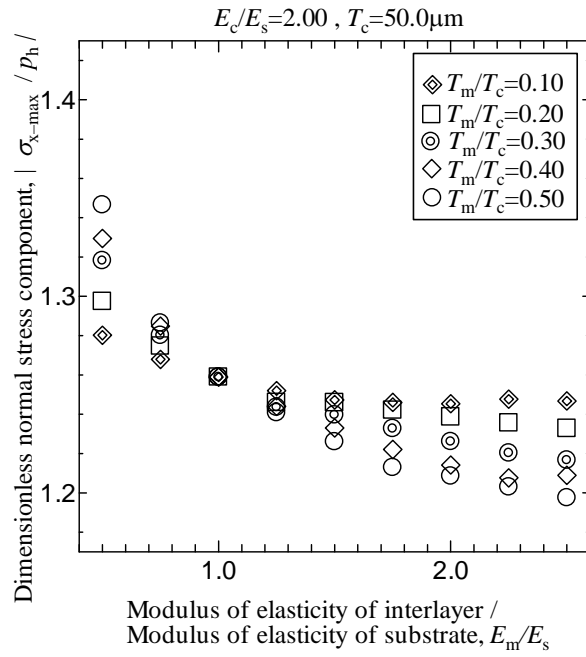


図 4.29 E_m/E_s と σ_x の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

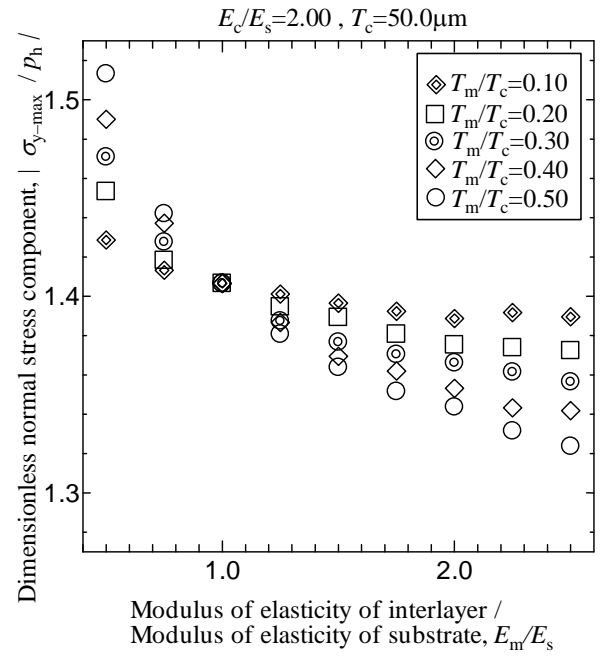


図 4.30 E_m/E_s と σ_y の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

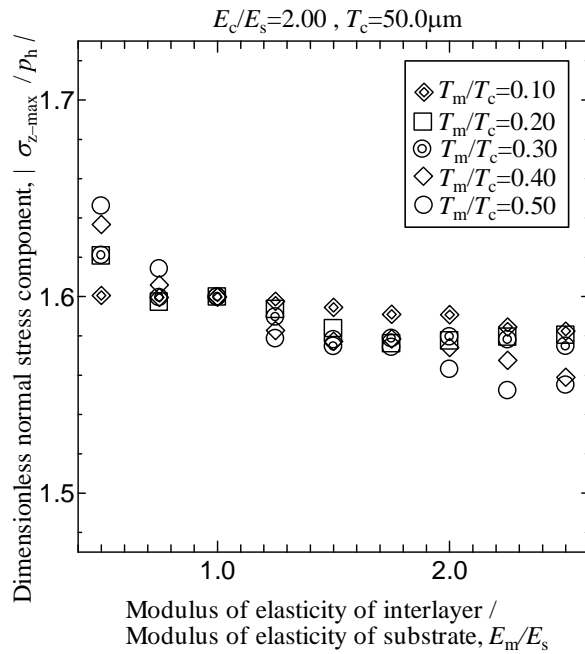


図 4.31 E_m/E_s と σ_z の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

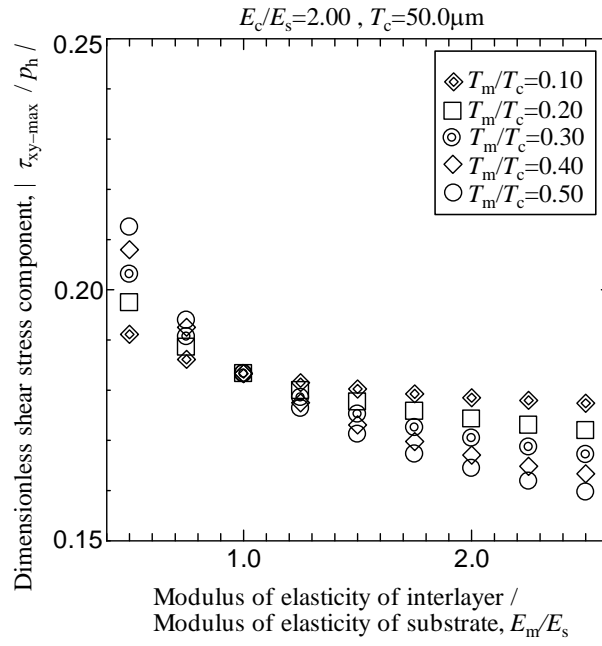


図 4.32 E_m/E_s と τ_{xy} の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

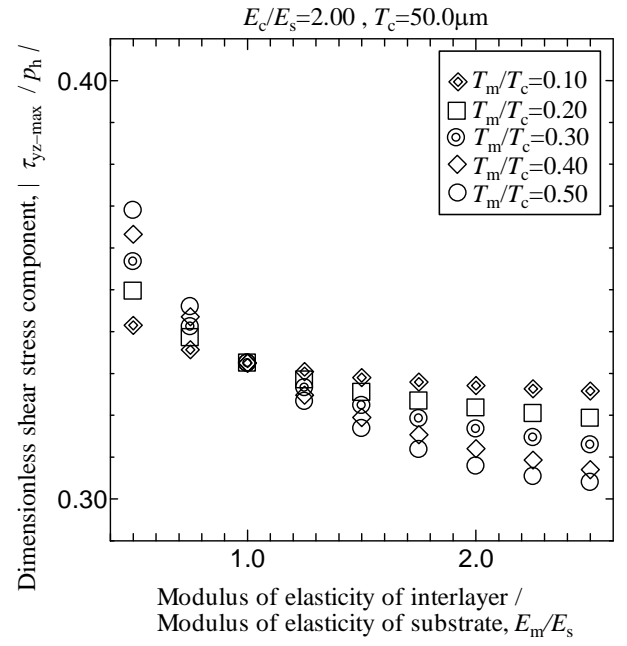


図 4.33 E_m/E_s と τ_{yz} の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

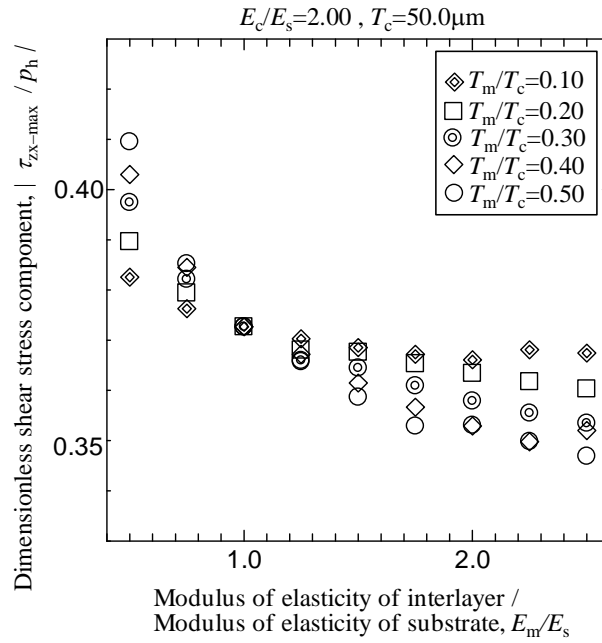


図 4.34 E_m/E_s と τ_{zx} の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

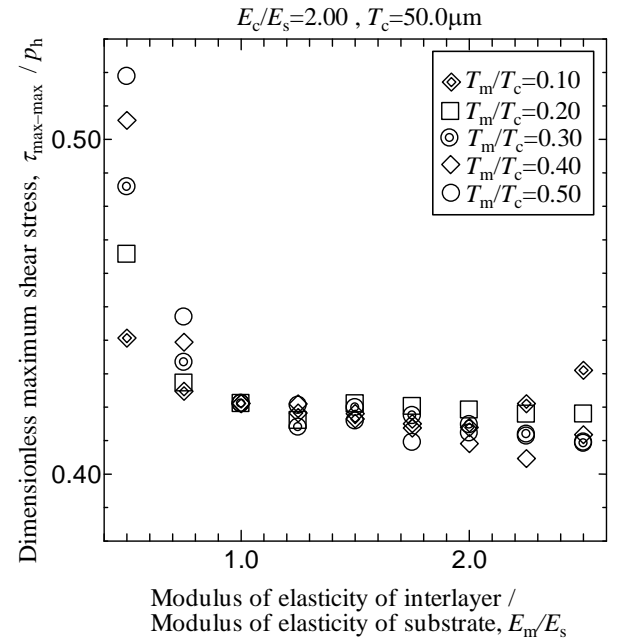
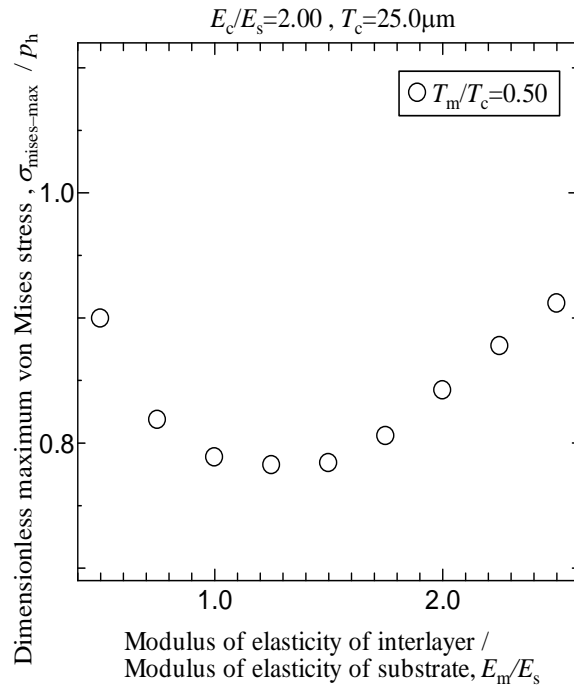
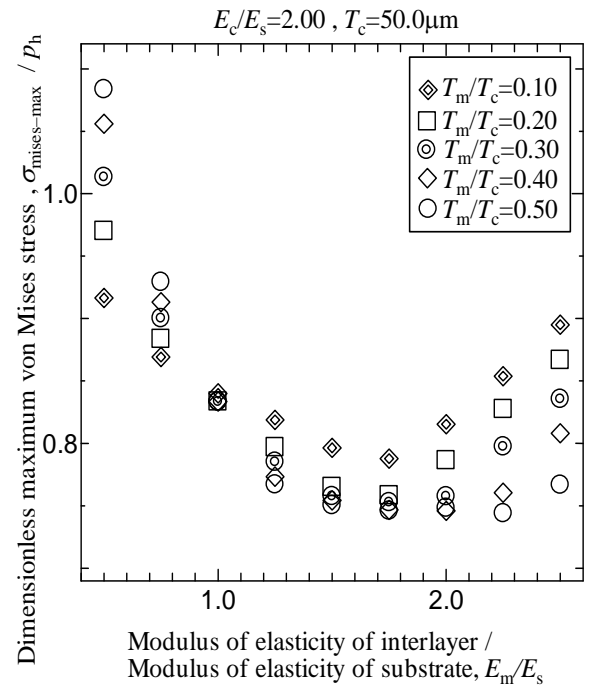


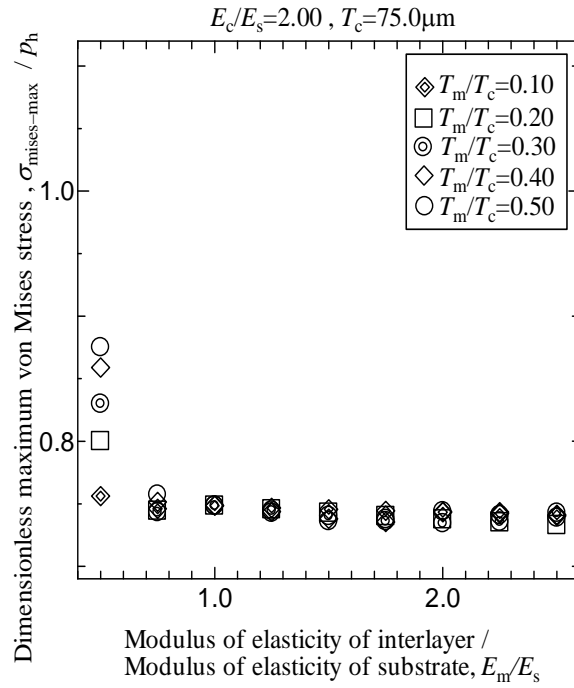
図 4.35 E_m/E_s と τ_{\max} の関係
($T_c=50\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)



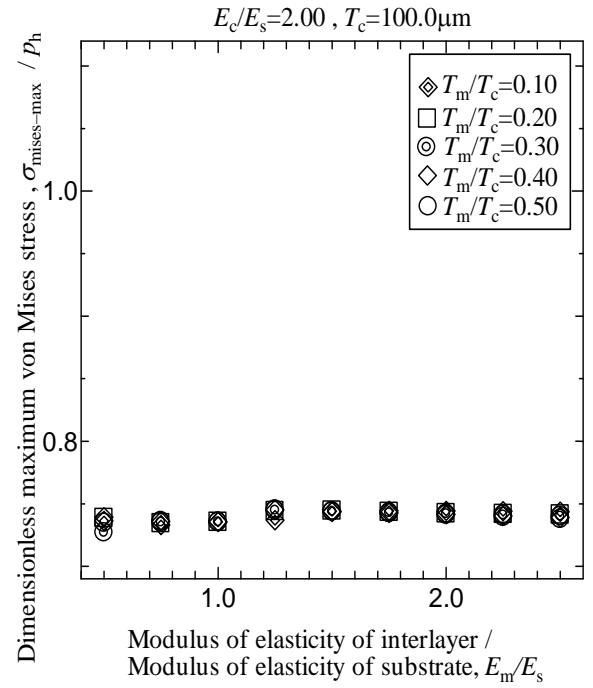
(a) $T_c=25.0\mu\text{m}, E_c/E_s=2.00$



(b) $T_c=50.0\mu\text{m}, E_c/E_s=2.00$

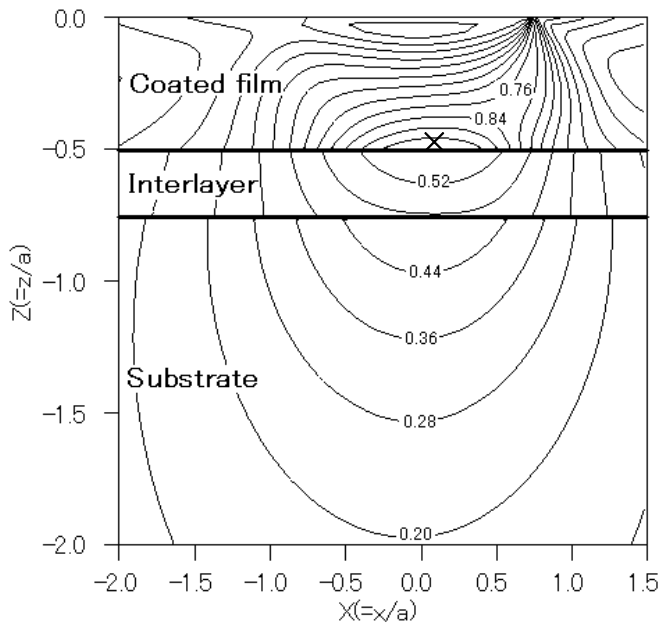


(c) $T_c=75.0\mu\text{m}, E_c/E_s=2.00$

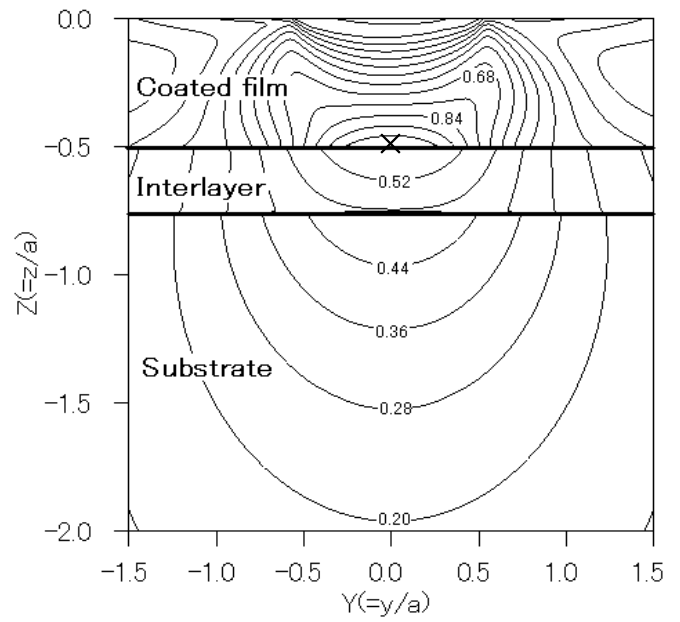


(d) $T_c=100.0\mu\text{m}, E_c/E_s=2.00$

図 4.36 E_m/E_s と $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ の関係

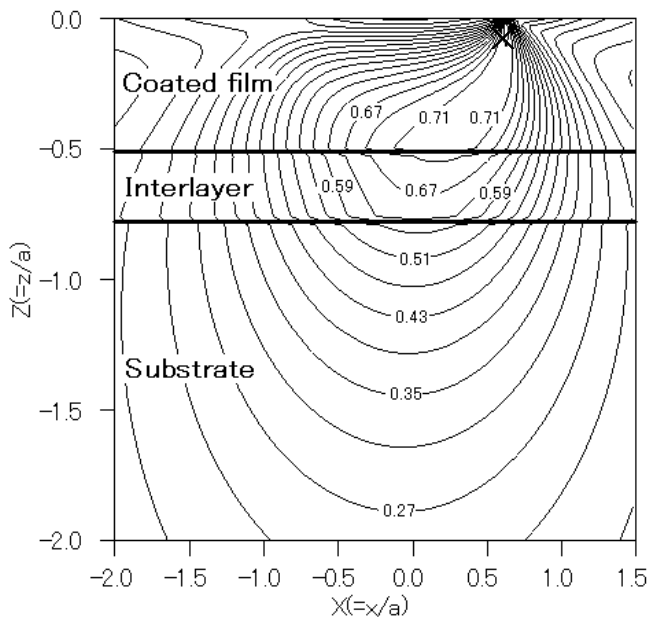


(a) X-Z 平面の分布図

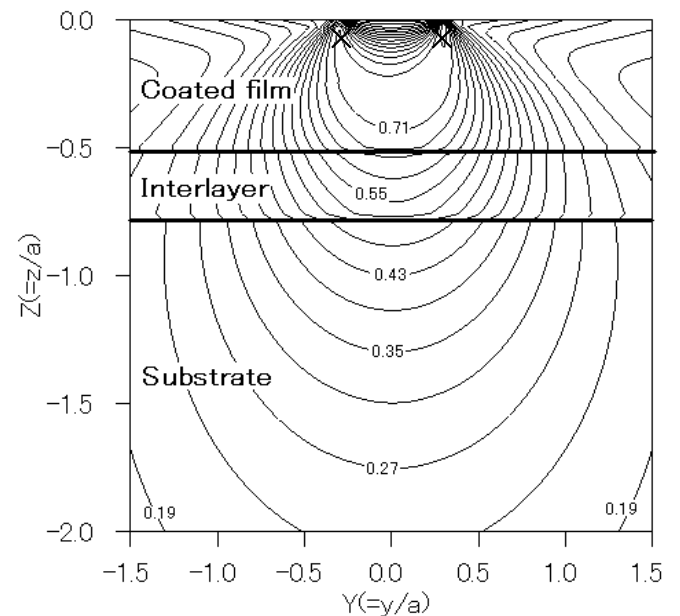


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.37 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=25.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=0.50$

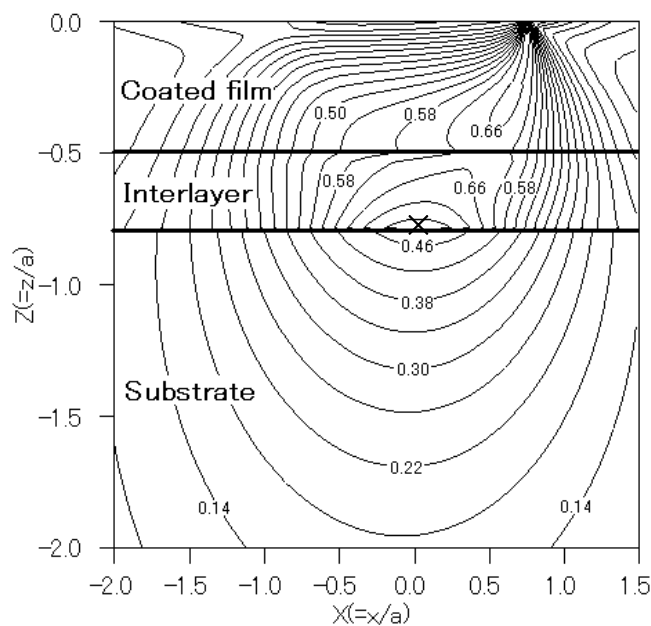


(a) X-Z 平面の分布図

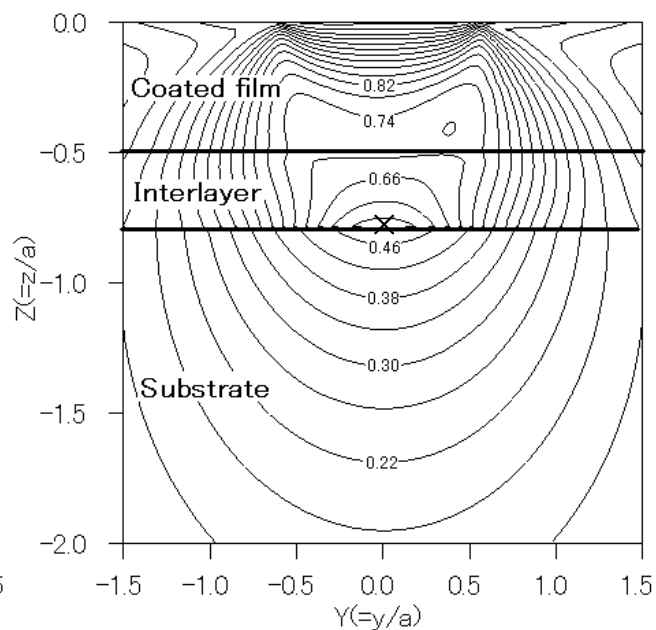


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.38 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=25.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=1.50$

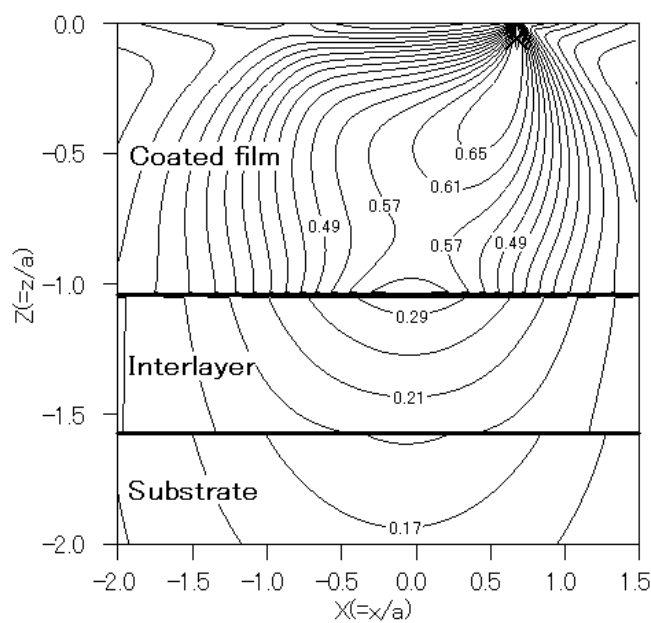


(a) X-Z 平面の分布図

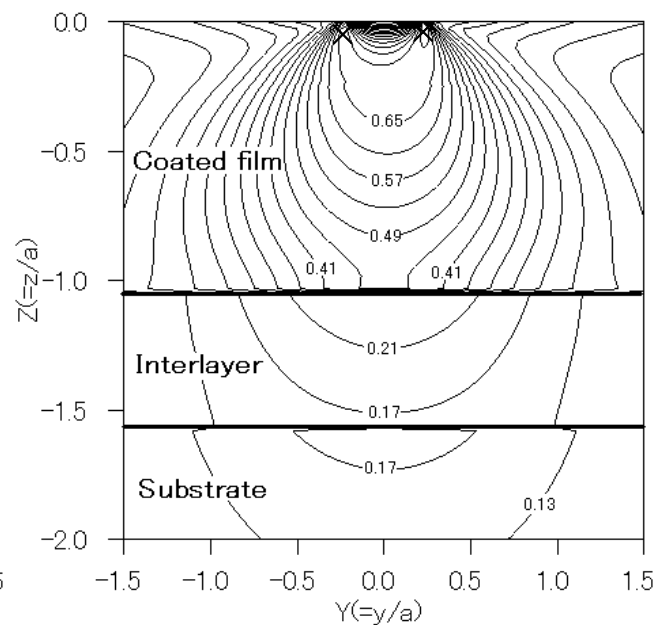


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.39 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=25.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=2.50$

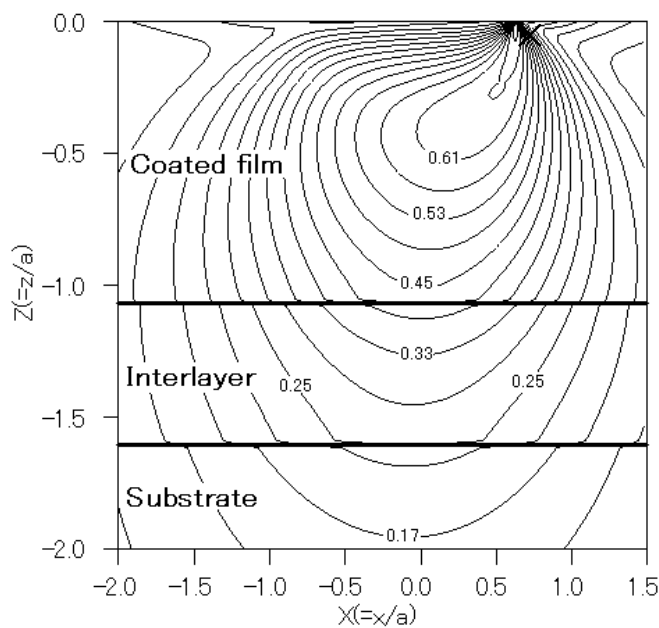


(a) X-Z 平面の分布図

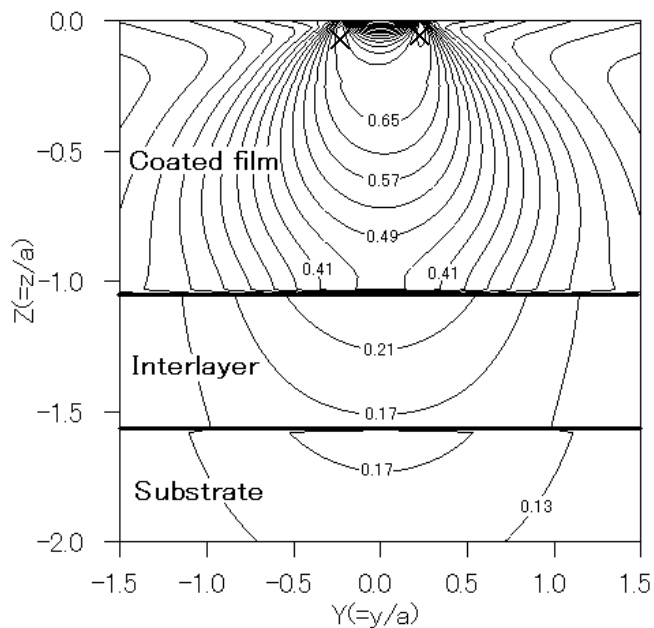


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.40 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=100.0[\mu\text{m}]$, $T_m=50.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=0.50$

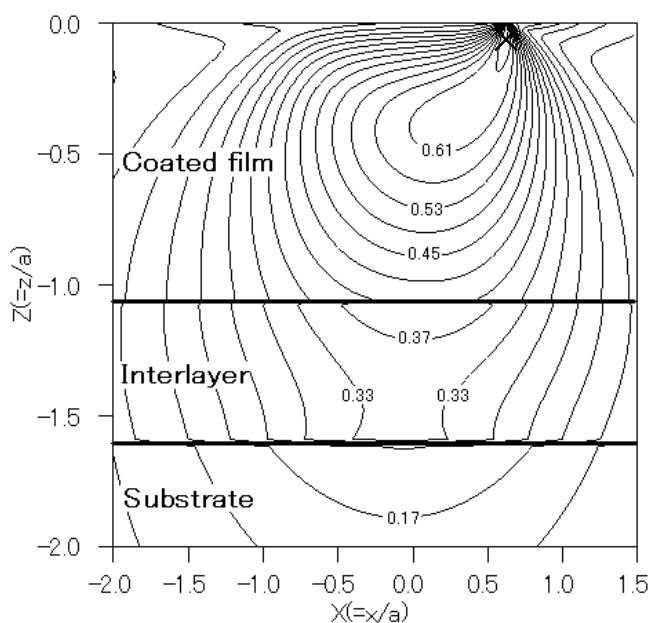


(a) X-Z 平面の分布図

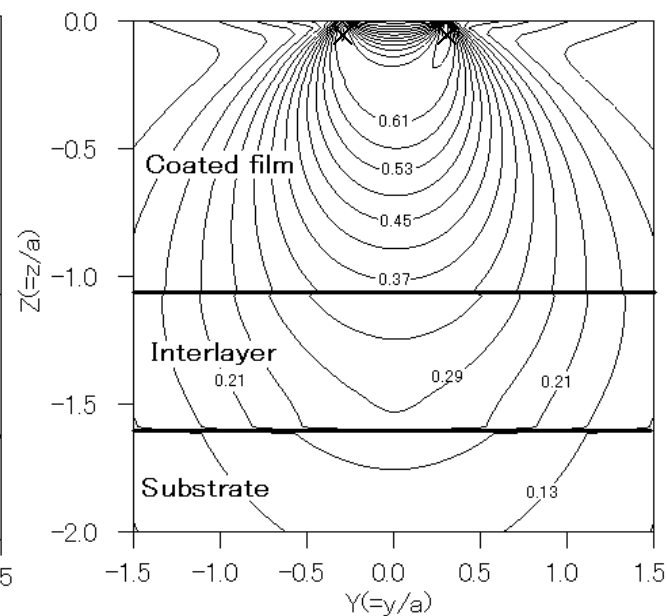


(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.41 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=100.0[\mu\text{m}]$, $T_m=50.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=1.50$



(a) X-Z 平面の分布図



(b) Y-Z 平面の分布図

図 4.42 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=100.0[\mu\text{m}]$, $T_m=50.0[\mu\text{m}]$, $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=2.50$

合のほうが，中間層の影響を顕著に受ける．

次に， T_c を変化させた場合の $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ に着目する． T_c が比較的大きい $T_c=100.0[\mu\text{m}]$ ， $T_m=50.0[\mu\text{m}]$ の場合，図 4.40(a)，(b)～図 4.42(a)，(b)に示されるように E_m/E_s の値に関わらず比較的高い領域は，コーティング膜内の表面近傍に集中している．従って， $E_m/E_s=0.5$ の場合と同様に図 4.36(d)に示されるように $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はほとんど変化しない．一方， T_c が比較的小さい $50.0[\mu\text{m}]$ の場合，図 4.37～図 4.39 に示すように， $E_m/E_s=0.50$ では，比較的高い領域は，コーティング膜と中間層との界面付近に集中しコーティング膜内で $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は生じ， $E_m/E_s=2.50$ では比較的高い領域は，中間層と下地金属との界面付近に集中し中間層内で $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は生じるのに対して， $E_m/E_s=1.50$ では，比較的高い領域は，中間層と下地金属との界面付近とコーティング膜の表面近傍に分散し， $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は表面近傍に生じる．従って，コーティング膜，中間層および下地金属のなかで最もヤング率が高い層の内部に $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ が移動する傾向がある．このように $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ の場合には， $E_m/E_s=0.5$ の場合と同様に E_m/E_s の変化に伴って材料内部で生じる応力分布が変化し，応力の高い領域が分散あるいは集中するために図 4.36(b)に示されるように $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は $E_m/E_s=1.50\sim 2.00$ 付近で最小値をもつと考える．すなわち，軟質コーティング膜を施した場合と同様に中間層のヤング率 E_m 値が，コーティング膜のヤング率 E_c 値と下地金属のヤング率 E_s 値との間にあるときに $\sigma_{\text{mises-max}}$ が最も小さくなる．

$E_m/E_s=2.00$ を中間層がなく下地金属上に硬質コーティング膜が一層施された場合として考えると，軟質コーティング膜の場合と同様に T_c が比較的小さい場合には，中間層を施すと材料内部で生じる $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は大きくなる場合があり T_c が大きい場合には，中間層を施しても $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は変化しない．

このように E_c ， E_m ， E_s の相対的大小により $\sigma_{\text{mises}}/p_h$ の分布および応力値が変化した結果，図 4.36(a)～(d)に示すように $\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ は変化すると考える．また定性的傾向は軟質コーティング膜を施した場合と非常によく似ている．

(b) 中間層とコーティング膜の厚さ比の影響

図 4.29～図 4.36 において最大応力値に対する T_m/T_c の影響について考察を行う．

$T_c=50.0[\mu\text{m}]$ 一定とし，同一 E_m/E_s で比較した場合，軟質コーティング膜を施した場合と同様に T_m がより大きくなると各応力の最大値の変化量はより大きくなる．従って，中間層が厚いほど，各応力の最大値に与える影響が大きくなる．

また E_m/E_s 値が 1.0 以下の場合には， T_m がより大きいほど，コーティング膜表面への作用外力となる P_{max} がより大きくなるので， $\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ ， $\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ ， $\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ ， $\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ ， $\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ および $\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ はより大きくなる．一方， E_m/E_s 値が 1.0 以上の場合には， T_m がより大きいほど， P_{max} がより小さくなるので， $\sigma_{x\text{-max}}/p_h$ ， $\sigma_{y\text{-max}}/p_h$ ， $\sigma_{z\text{-max}}/p_h$ ， $\tau_{xy\text{-max}}/p_h$ ， $\tau_{yz\text{-max}}/p_h$ および $\tau_{zx\text{-max}}/p_h$ はより小さくなる．従って，硬質コー

ティング膜を施した場合では、軟質コーティング膜を施した場合と定性的な傾向は逆になる。しかしながら、 $\tau_{\max-\max}/p_h$ および $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は、 T_m/T_c の変化に伴って、コーティング膜、中間層および下地金属の内部で生じる応力の分布が変化するために定性的な傾向を示さない。

次に、 T_c を変化させた場合の $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ に着目する。 $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ の場合には、上記に示したように同一 E_m/E_s で比較した場合、 T_m がより大きくなると各応力の最大値の変化量はより大きくなるのに対して、 $T_c=100[\mu\text{m}]$ の場合には、 E_m/E_s および T_m/T_c が変化しても $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ は変化しない。また付表 4.11～付表 4.15 より T_m が変化しても $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はコーティング膜内の表面近傍で生じ、その位置は変化しない。

4. 4 小結

弾性流体潤滑下で点接触している際に使用される中間層を有するコーティング膜に対して、油膜圧力および油膜厚さを二次元解析するとともに、コーティング膜、中間層および下地金属内で生じる応力状態を三次元解析し考察を行った。本章で得られた結果および考察をまとめると以下ようになる。

- (1) 軟質コーティング膜を施した場合 ($E_c/E_s=0.5$) には、中間層のヤング率がより大きくなると、油膜圧力によって生じるコーティング膜表面の変形が小さくなるので、有次元油膜圧力の高い領域が x 方向および y 方向ともに接触中心に集中し、有次元最大油膜圧力はより大きく、有次元最小油膜厚さはより小さくなる。
- (2) 軟質コーティング膜を施した場合には、中間層のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合、中間層の厚さがより大きくなると、油膜圧力によって生じるコーティング膜表面の変形が大きくなり、単位面積当たりの負荷が小さくなるので、有次元最大油膜圧力はより小さく、有次元最小油膜厚さはより大きくなる。一方、中間層のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合には、中間層の厚さがより大きくなると、有次元最大油膜圧力はより大きく、有次元最小油膜厚さはより小さくなる。
- (3) 硬質コーティング膜を施した場合 ($E_c/E_s=2.0$) には、中間層のヤング率がより大きくなると、軟質コーティング膜を施した場合と同様に有次元最小油膜厚さはより小さくなる。しかしながら、有次元油膜圧力に関しては、計算時間と計算機の性能による制約上、定性的な傾向を正確に把握することができない。
- (4) 硬質コーティング膜を施した場合には、中間層のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合、中間層の厚さがより大きくなると有次元最小油膜厚さはより大きくなり、中間層のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合、中間層の厚さがより大きくなると有次元最小油膜厚さはより小さくなる。しかしながら、有次元油膜圧力に関しては、計算時間と計算機の性能による制約

上、定性的な傾向を正確に把握することができない。

- (5) 中間層の厚さが一定の場合、中間層のヤング率の変化に対する各応力の最大値の変化は、軟質コーティング膜を施した場合より硬質コーティング膜を施した場合のほうが大きい。
- (6) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜に関わらず、中間層のヤング率がより大きくなると、コーティング膜の厚さが比較的薄い場合には材料内部で生じる **von Mises** 応力の最大値は計算された条件の範囲内で最小値を生じる。一方、コーティング膜の厚さが比較的厚い場合には **von Mises** 応力の最大値はほとんど変化しない。
- (7) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜に関わらず、コーティング膜の厚さが比較的薄い場合には中間層を施すと、**von Mises** 応力の最大値は中間層がない場合と比較して大きくなる場合があるが、コーティング膜の厚さが比較的厚い場合には中間層の有無に関係なく材料内部で生じる **von Mises** 応力の最大値はほとんど変化しない。
- (8) 軟質コーティング膜を施した場合、コーティング膜の厚さが比較的薄い場合には、中間層の厚さを大きくすると、**von Mises** 応力の最大値が生じる位置は、中間層と下地金属との界面付近に移動する。一方、コーティング膜の厚さが比較的厚い場合には、中間層の厚さに関係なく、**von Mises** 応力の最大値は中間層内部で生じる。
- (9) 硬質コーティング膜を施した場合には、コーティング膜の厚さが比較的薄い場合には、**von Mises** 応力の最大値はコーティング膜、中間層および下地金属のうちヤング率が一番高い材料の内部で生じる。一方、コーティング膜の厚さが比較的厚い場合には、**von Mises** 応力の最大値はコーティング膜内で生じ移動しない。

参考文献

- [4.1] 橋本巨著：基礎から学ぶトライボロジー，森北出版株式会社 (2006).

付表 4.1 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $T_m=5.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.25	0.450	0.495	0.317	(0.175, 0.000, -0.332)	0.643	(0.150, 0.000, -0.332)
0.50	0.452	0.498	0.308	(0.750, 0.000, -0.051)	0.622	(0.150, 0.025, -0.304)
0.75	0.455	0.500	0.309	(0.750, 0.000, -0.051)	0.614	(0.175, 0.025, -0.304)
1.00	0.455	0.501	0.308	(0.750, 0.000, -0.051)	0.613	(0.150, 0.025, -0.500)
1.25	0.456	0.502	0.313	(0.225, 0.000, -0.473)	0.637	(0.150, 0.025, -0.473)
1.50	0.457	0.502	0.324	(0.200, 0.000, -0.473)	0.660	(0.150, 0.025, -0.473)
1.75	0.457	0.503	0.334	(0.175, 0.000, -0.473)	0.682	(0.150, 0.025, -0.473)
2.00	0.458	0.504	0.343	(0.175, 0.000, -0.473)	0.703	(0.150, 0.025, -0.473)

付表 4.2 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $T_m=10.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.25	0.442	0.531	0.333	(0.150, 0.000, -0.388)	0.678	(0.125, 0.000, -0.388)
0.50	0.450	0.541	0.318	(0.200, 0.000, -0.335)	0.644	(0.150, 0.025, -0.335)
0.75	0.455	0.545	0.306	(0.250, 0.000, -0.304)	0.618	(0.175, 0.025, -0.304)
1.00	0.455	0.546	0.308	(0.750, 0.000, -0.051)	0.613	(0.150, 0.025, -0.501)
1.25	0.456	0.547	0.315	(0.175, 0.000, -0.522)	0.642	(0.125, 0.025, -0.522)
1.50	0.457	0.548	0.328	(0.150, 0.000, -0.522)	0.669	(0.125, 0.025, -0.522)
1.75	0.457	0.549	0.340	(0.150, 0.000, -0.522)	0.695	(0.125, 0.025, -0.522)
2.00	0.458	0.550	0.351	(0.125, 0.000, -0.522)	0.720	(0.125, 0.025, -0.522)

付表 4.3 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $T_m=15.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.25	0.439	0.570	0.350	(0.125, 0.000, -0.417)	0.715	(0.125, 0.000, -0.417)
0.50	0.450	0.586	0.316	(0.175, 0.000, -0.332)	0.640	(0.150, 0.025, -0.332)
0.75	0.452	0.588	0.308	(0.750, 0.000, -0.051)	0.620	(0.150, 0.025, -0.304)
1.00	0.455	0.591	0.308	(0.750, 0.000, -0.051)	0.613	(0.150, 0.025, -0.501)
1.25	0.456	0.593	0.311	(0.150, 0.000, -0.551)	0.634	(0.125, 0.025, -0.551)
1.50	0.457	0.595	0.323	(0.125, 0.000, -0.551)	0.660	(0.125, 0.025, -0.551)
1.75	0.459	0.596	0.343	(0.100, 0.000, -0.579)	0.704	(0.100, 0.000, -0.579)
2.00	0.461	0.599	0.357	(0.100, 0.000, -0.579)	0.734	(0.100, 0.000, -0.579)

付表 4.4 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $T_m=20.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.25	0.435	0.609	0.365	(0.125, 0.000, -0.412)	0.746	(0.100, 0.000, -0.412)
0.50	0.446	0.625	0.319	(0.150, 0.000, -0.332)	0.647	(0.125, 0.000, -0.332)
0.75	0.450	0.631	0.309	(0.750, 0.000, -0.051)	0.622	(0.150, 0.025, -0.450)
1.00	0.455	0.636	0.308	(0.750, 0.000, -0.051)	0.612	(0.150, 0.025, -0.494)
1.25	0.457	0.639	0.309	(0.125, 0.000, -0.607)	0.630	(0.100, 0.025, -0.607)
1.50	0.459	0.642	0.322	(0.100, 0.000, -0.607)	0.659	(0.100, 0.025, -0.607)
1.75	0.460	0.644	0.336	(0.100, 0.000, -0.607)	0.688	(0.100, 0.025, -0.607)
2.00	0.462	0.646	0.349	(0.100, 0.000, -0.607)	0.716	(0.075, 0.000, -0.607)

付表 4.5 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $T_m=25.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.25	0.435	0.652	0.376	(0.100, 0.000, -0.412)	0.770	(0.100, 0.000, -0.412)
0.50	0.446	0.670	0.321	(0.150, 0.000, -0.360)	0.653	(0.125, 0.000, -0.360)
0.75	0.450	0.676	0.310	(0.750, 0.000, -0.051)	0.628	(0.150, 0.025, -0.450)
1.00	0.455	0.682	0.308	(0.750, 0.000, -0.051)	0.612	(0.150, 0.025, -0.494)
1.25	0.457	0.685	0.304	(0.750, 0.000, -0.051)	0.621	(0.075, 0.025, -0.663)
1.50	0.459	0.688	0.320	(0.075, 0.000, -0.663)	0.655	(0.075, 0.000, -0.663)
1.75	0.460	0.690	0.336	(0.075, 0.000, -0.663)	0.688	(0.075, 0.000, -0.663)
2.00	0.462	0.692	0.351	(0.075, 0.000, -0.663)	0.721	(0.075, 0.000, -0.663)

付表 4.6 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果
($T_c=100.0\mu\text{m}$, $T_m=10.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.25	0.870	0.957	0.330	(0.725, 0.050, -0.076)	0.668	(0.125, 0.025, -0.417)
0.50	0.877	0.965	0.328	(0.150, 0.000, -0.388)	0.667	(0.125, 0.000, -0.388)
0.75	0.881	0.969	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.667	(0.125, 0.000, -0.388)
1.00	0.885	0.973	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.125, 0.000, -0.388)
1.25	0.887	0.975	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.125, 0.000, -0.388)
1.50	0.888	0.977	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.665	(0.125, 0.000, -0.388)
1.75	0.890	0.979	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.665	(0.100, 0.000, -0.388)
2.00	0.891	0.980	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.664	(0.100, 0.000, -0.388)

付表 4.7 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果

(T_c=100.0μm, T_m=20.0μm, E_c/E_s=0.50)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\max-\max}/p_h$	$\tau_{\max-\max}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.25	0.870	1.043	0.335	(0.075, 0.000, -0.076)	0.669	(0.125, 0.025, -0.445)
0.50	0.877	1.053	0.328	(0.150, 0.000, -0.388)	0.667	(0.125, 0.025, -0.417)
0.75	0.881	1.057	0.328	(0.150, 0.000, -0.388)	0.667	(0.125, 0.000, -0.388)
1.00	0.885	1.062	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.125, 0.000, -0.388)
1.25	0.887	1.064	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.100, 0.000, -0.388)
1.50	0.888	1.066	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.665	(0.100, 0.000, -0.388)
1.75	0.890	1.068	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.665	(0.100, 0.000, -0.388)
2.00	0.891	1.070	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.664	(0.100, 0.000, -0.388)

付表 4.8 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果

(T_c=100.0μm, T_m=30.0μm, E_c/E_s=0.50)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\max-\max}/p_h$	$\tau_{\max-\max}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.25	0.862	1.121	0.338	(0.725, 0.000, -0.102)	0.669	(0.150, 0.025, -0.445)
0.50	0.877	1.140	0.330	(0.750, 0.000, -0.076)	0.667	(0.125, 0.025, -0.417)
0.75	0.879	1.143	0.328	(0.150, 0.000, -0.388)	0.666	(0.125, 0.000, -0.388)
1.00	0.885	1.150	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.125, 0.000, -0.388)
1.25	0.887	1.152	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.100, 0.000, -0.388)
1.50	0.888	1.155	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.100, 0.000, -0.388)
1.75	0.890	1.157	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.665	(0.100, 0.000, -0.388)
2.00	0.891	1.159	0.327	(0.125, 0.000, -0.388)	0.665	(0.100, 0.000, -0.388)

付表 4.9 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果

(T_c=100.0μm, T_m=40.0μm, E_c/E_s=0.50)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\max-\max}/p_h$	$\tau_{\max-\max}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.25	0.855	1.197	0.342	(0.725, 0.000, -0.102)	0.668	(0.175, 0.025, -0.445)
0.50	0.870	1.217	0.330	(0.725, 0.000, -0.102)	0.666	(0.125, 0.025, -0.417)
0.75	0.877	1.228	0.328	(0.150, 0.000, -0.388)	0.666	(0.125, 0.025, -0.388)
1.00	0.885	1.239	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.125, 0.000, -0.388)
1.25	0.887	1.241	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.100, 0.000, -0.388)
1.50	0.888	1.243	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.100, 0.000, -0.388)
1.75	0.890	1.246	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.100, 0.000, -0.388)
2.00	0.891	1.248	0.328	(0.100, 0.000, -0.388)	0.666	(0.100, 0.000, -0.388)

付表 4.10 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果

(T_c=100.0μm, T_m=50.0μm, E_c/E_s=0.50)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\max-\max}/p_h$	$\tau_{\max-\max}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.25	0.855	1.282	0.344	(0.725, 0.000, -0.127)	0.668	(0.200, 0.050, -0.445)
0.50	0.870	1.304	0.331	(0.725, 0.000, -0.102)	0.665	(0.150, 0.025, -0.417)
0.75	0.877	1.316	0.327	(0.150, 0.000, -0.388)	0.665	(0.125, 0.025, -0.388)
1.00	0.885	1.327	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.666	(0.125, 0.000, -0.388)
1.25	0.888	1.331	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.667	(0.100, 0.000, -0.388)
1.50	0.890	1.335	0.328	(0.125, 0.000, -0.388)	0.667	(0.100, 0.000, -0.388)
1.75	0.890	1.335	0.328	(0.100, 0.000, -0.388)	0.667	(0.100, 0.000, -0.388)
2.00	0.890	1.335	0.328	(0.100, 0.000, -0.388)	0.668	(0.100, 0.000, -0.388)

付表 4.11 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果

(T_c=100.0μm, T_m=10.0μm, E_c/E_s=2.00)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\max-\max}/p_h$	$\tau_{\max-\max}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.50	1.064	1.170	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.736	(0.625, 0.300, -0.025)
0.75	1.067	1.173	0.405	(0.750, 0.000, -0.025)	0.733	(0.675, 0.225, -0.025)
1.00	1.070	1.176	0.402	(0.750, 0.000, -0.025)	0.736	(0.675, 0.225, -0.025)
1.25	1.072	1.180	0.401	(0.750, 0.000, -0.025)	0.737	(0.675, 0.225, -0.025)
1.50	1.075	1.183	0.406	(0.750, 0.025, -0.025)	0.744	(0.625, 0.300, 0.000)
1.75	1.078	1.185	0.406	(0.750, 0.025, -0.025)	0.744	(0.625, 0.300, 0.000)
2.00	1.080	1.188	0.406	(0.750, 0.025, -0.025)	0.744	(0.625, 0.300, 0.000)
2.25	1.082	1.190	0.406	(0.750, 0.025, -0.025)	0.744	(0.625, 0.300, 0.000)
2.50	1.085	1.193	0.406	(0.750, 0.000, -0.025)	0.744	(0.625, 0.300, 0.000)

付表 4.12 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果

(T_c=100.0μm, T_m=20.0μm, E_c/E_s=2.00)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\max-\max}/p_h$	$\tau_{\max-\max}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.50	1.064	1.277	0.408	(0.750, 0.000, -0.025)	0.739	(0.625, 0.300, -0.025)
0.75	1.068	1.281	0.406	(0.750, 0.000, -0.025)	0.734	(0.625, 0.300, -0.025)
1.00	1.071	1.286	0.402	(0.750, 0.000, -0.025)	0.736	(0.675, 0.225, -0.025)
1.25	1.075	1.290	0.406	(0.750, 0.025, -0.025)	0.744	(0.625, 0.300, 0.000)
1.50	1.077	1.293	0.407	(0.750, 0.025, -0.025)	0.745	(0.625, 0.300, 0.000)
1.75	1.079	1.295	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.744	(0.625, 0.300, 0.000)
2.00	1.081	1.297	0.407	(0.750, 0.025, -0.025)	0.742	(0.625, 0.300, 0.000)
2.25	1.083	1.300	0.407	(0.750, 0.025, -0.025)	0.742	(0.625, 0.300, -0.025)
2.50	1.085	1.302	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.741	(0.625, 0.300, -0.025)

付表 4.13 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果
($T_c=100.0\mu\text{m}$, $T_m=30.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.50	1.064	1.383	0.400	(0.750, 0.000, -0.025)	0.727	(0.625, 0.300, -0.025)
0.75	1.068	1.388	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.735	(0.625, 0.300, -0.025)
1.00	1.071	1.393	0.402	(0.750, 0.000, -0.025)	0.736	(0.675, 0.225, -0.025)
1.25	1.075	1.398	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.745	(0.625, 0.300, 0.000)
1.50	1.077	1.400	0.407	(0.750, 0.025, -0.025)	0.744	(0.625, 0.300, 0.000)
1.75	1.079	1.403	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.743	(0.625, 0.300, -0.025)
2.00	1.081	1.405	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.742	(0.625, 0.300, -0.025)
2.25	1.083	1.408	0.406	(0.750, 0.000, -0.025)	0.741	(0.625, 0.300, -0.025)
2.50	1.085	1.410	0.406	(0.750, 0.000, -0.025)	0.740	(0.625, 0.300, -0.025)

付表 4.14 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果
($T_c=100.0\mu\text{m}$, $T_m=40.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.50	1.064	1.489	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.739	(0.650, 0.275, -0.025)
0.75	1.068	1.495	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.736	(0.625, 0.300, -0.025)
1.00	1.071	1.500	0.402	(0.750, 0.000, -0.025)	0.736	(0.675, 0.225, -0.025)
1.25	1.075	1.505	0.407	(0.750, 0.025, -0.025)	0.745	(0.625, 0.300, 0.000)
1.50	1.077	1.508	0.408	(0.750, 0.000, -0.025)	0.744	(0.625, 0.300, 0.000)
1.75	1.079	1.511	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.743	(0.625, 0.300, -0.025)
2.00	1.081	1.514	0.406	(0.750, 0.000, -0.025)	0.742	(0.625, 0.300, 0.000)
2.25	1.083	1.516	0.405	(0.750, 0.000, -0.025)	0.740	(0.625, 0.300, -0.025)
2.50	1.085	1.519	0.404	(0.750, 0.000, -0.025)	0.739	(0.625, 0.300, -0.025)

付表 4.15 最大せん断応力と von Mises 応力の解析結果
 $(T_c=100.0\mu\text{m}, T_m=50.0\mu\text{m}, E_c/E_s=2.00)$

E_m/E_s	Z_c	Z_m	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$	$\tau_{\text{max-max}}/p_h$ の発生位置	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$	$\sigma_{\text{mises-max}}/p_h$ の発生位置
[-]	[-]	[-]	[-]	(X, Y, Z)	[-]	(X, Y, Z)
0.50	1.053	1.579	0.402	(0.750, 0.000, -0.025)	0.735	(0.675, 0.225, -0.025)
0.75	1.064	1.596	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.736	(0.625, 0.300, -0.025)
1.00	1.070	1.604	0.402	(0.750, 0.000, -0.025)	0.736	(0.675, 0.225, -0.025)
1.25	1.075	1.613	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.745	(0.625, 0.300, 0.000)
1.50	1.077	1.616	0.408	(0.750, 0.000, -0.025)	0.744	(0.625, 0.300, -0.025)
1.75	1.079	1.619	0.407	(0.750, 0.000, -0.025)	0.743	(0.625, 0.300, -0.025)
2.00	1.081	1.622	0.408	(0.750, 0.000, -0.025)	0.741	(0.625, 0.300, -0.025)
2.25	1.083	1.625	0.404	(0.750, 0.000, -0.025)	0.740	(0.625, 0.300, -0.025)
2.50	1.085	1.627	0.403	(0.750, 0.000, -0.025)	0.738	(0.625, 0.300, -0.025)

第5章 傾斜層を有するコーティング膜の応力分布と油膜厚さ

前章では第2章に示した解析方法を用いて、図2.1(b)に示される下地金属とコーティング膜の間に双方の性質とは全く異なる性質を有する中間層が施されたモデルに対して、油膜圧力、油膜厚さならびにコーティング膜、中間層および下地金属内に生じる応力状態を解析した結果を示し考察を行った。

実際にコーティング膜を施す際には、コーティング膜と下地金属との密着力の強化を目的として、コーティング膜と下地金属との間に中間層のみならず、傾斜層を用いる場合がある。中間層は材料の内部で性質が変化しないのに対して、傾斜層は厚さ方向に材料内部の性質が変化する。

本章では、第2章に示した解析方法を用いて、下地金属とコーティング膜の間に、下地金属の性質からコーティング膜の性質へ連続的に性質が変化する傾斜層が施されたモデルについて油膜圧力、油膜厚さならびにコーティング膜、傾斜層および下地金属内に生じる応力状態を解析した結果を示し、主に中間層を用いた場合と傾斜層を用いた場合を比較し考察を行う。

5.1 解析条件

本研究の解析条件を表5.1に示す。球および下地金属は鋼材（ヤング率 206GPa，ポアソン比は 0.3）とする。コーティング膜のヤング率 E_c は、前章に示した中間層がある場合の解析と同様に下地金属のヤング率 E_s の 0.5 倍（軟質コーティング膜）と 2.0 倍（硬質コーティング膜）の値とし、ポアソン比は 0.3，コーティング膜の厚さは $T_c=50.0[\mu\text{m}]$ 一定とする。

図4.17(b)および図4.36(b)より軟質コーティング膜および硬質コーティング膜を問わず、中間層のヤング率 E_m 値が、コーティング膜のヤング率 E_c 値と下地金属のヤング率 E_s 値との間にあるときに $\sigma_{\text{mises-max}}$ が最も小さくなる。そこで本研究では、傾斜層は下地金属の性質からコーティング膜の性質へ連続的に性質が変化するものとする。この傾斜層を有するコーティング膜に対し第2章で示した解析方法を適用し、油膜圧力、油膜厚さおよび内部応力を解析するために、便宜上、傾斜層の厚さ方向を複数の層に分割し、分割された各層のヤング率をコーティング膜のヤング率から下地金属のヤング率へ線形に変化させることで傾斜層を模擬する。ここで、傾斜層の厚さはコーティング膜の厚さの 0.1 倍、0.2 倍および 0.4 倍とし、傾斜層を構成する各膜材の厚さおよびポアソン比(=0.3)はどれも等しいものとして解析を行う。なお要素分割の関係上、傾斜層の厚さ T_m が $5.0[\mu\text{m}]$ ($T_m/T_c=0.1$) の場合には傾斜層を 3 層に分割、 $T_m=10.0[\mu\text{m}]$ ($T_m/T_c=0.2$) の場合には傾斜層を 5 層に分割、 $T_m=20.0[\mu\text{m}]$ ($T_m/T_c=0.4$) の場合には傾斜層を 8 層に分割して解析を行う。中間層は単一の材料で構成されており、厚さ方向にヤング率およびポアソン比(=0.3)は変化し

表 5.1 解析条件

無次元荷重パラメータ, W	1.73×10^{-7}
無次元速度パラメータ, U	8.83×10^{-12}
無次元材料パラメータ, G	4980
球のヤング率, E_b [GPa]	206
球のポアソン比, κ_b	0.3
コーティング膜のヤング率, E_c [GPa]	103.0 ($E_c/E_s=0.50$) , 412.0 ($E_c/E_s=2.00$)
コーティング膜のポアソン比, κ_c	0.3
中間層のヤング率, E_m [GPa]	154.5 ($E_m/E_s=0.75$) , 309.0 ($E_m/E_s=1.50$)
中間層のポアソン比, κ_m	0.3
傾斜層のヤング率, E_g [GPa]	103.0 ~ 412.0 ($E_g/E_s=0.50 \sim 2.00$)
傾斜層のポアソン比, κ_g	0.3
下地金属のヤング率, E_s [GPa]	206
下地金属のポアソン比, κ_s	0.3
コーティング膜の厚さ, T_c [μm]	50.0
傾斜層の厚さ, T_m [μm]	5.0 ~ 20.0
傾斜層を構築する最大積層数, N_{\max} [層]	3 : ($T_m=5.0[\mu\text{m}]$) 5 : ($T_m=10.0[\mu\text{m}]$) 8 : ($T_m=20.0[\mu\text{m}]$)

ない。

5.2 油膜圧力および油膜厚さ

油膜圧力および油膜厚さを解析した結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜ともに、中間層を用いた場合と傾斜層を用いた場合を比較すると、無次元最大油膜圧力の値とその発生位置、また無次元最小油膜厚さの値とその発生位置はほとんど変化しない。従って、無次元最大油膜圧力および無次元最小油膜厚さに対する中間層と傾斜層の違いによる影響は非常に小さい。

以下にその詳細について述べるとともに考察を行う。

5.2.1 軟質コーティング膜における傾斜層の影響 ($E_c/E_s=0.5$ の場合)

図 5.1 および図 5.2 は、厚さ $50.0[\mu\text{m}]$ の軟質コーティング膜を施した場合における、中間層または傾斜層の厚さ T_m と無次元最大油膜圧力 P_{\max} および無次元最小油膜厚さ H_{\min} の関係を示す。また付表 5.1 は無次元最大油膜圧力 P_{\max} の値とその発生位置および無次元最小油膜厚さ H_{\min} の値とその発生位置を示す。中間層のヤング率は、コーティング膜のヤング率と下地金属のヤング率の中間の値である $E_m/E_s=0.75$ とし、ポアソン比は 0.3 である。傾斜層を構成するそれぞれの膜のヤング率はコーティング膜のヤング率から下地金属のヤング率の間 ($E_m/E_s=0.50 \sim 1.00$) で線形的に変化する。

中間層を用いた場合と傾斜層を用いた場合を比較すると、 T_m に関係なく P_{\max} および H_{\min} はほとんど変化しない。また P_{\max} および H_{\min} が生じる位置も変化しない。従って、 P_{\max} および H_{\min} に対する中間層と傾斜層の違いによる影響は非常に小さいと考える。これは、中間層を用いた場合のコーティング膜表面の変形量と傾斜層を用いた場合のコーティング膜表面の変形量はほとんど変化しないために生じると考える。

5.2.2 硬質コーティング膜における傾斜層の影響 ($E_c/E_s=2.0$ の場合)

図 5.3 および図 5.4 は、厚さ $50.0[\mu\text{m}]$ の硬質コーティング膜を施した場合における、中間層または傾斜層の厚さ T_m と無次元最大油膜圧力 P_{\max} および無次元最小油膜厚さ H_{\min} の関係を示す。また付表 5.2 は無次元最大油膜圧力 P_{\max} の値とその発生位置および無次元最小油膜厚さ H_{\min} の値とその発生位置を示す。中間層のヤング率は、コーティング膜のヤング率と下地金属のヤング率の中間の値である $E_m/E_s=1.50$ とし、ポアソン比は 0.3 である。傾斜層を構成するそれぞれの膜のヤング率はコーティング膜のヤング率値から下地金属のヤング率の間 ($E_m/E_s=1.00 \sim 2.00$) で線形的に変化する。

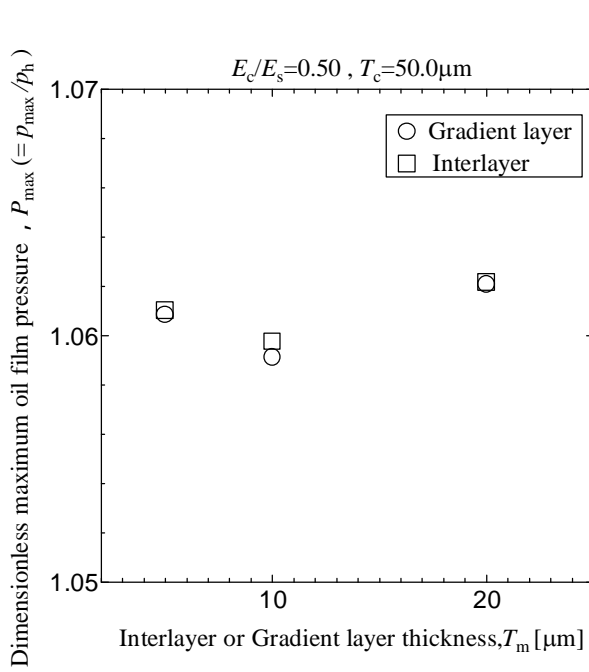


図 5.1 T_m と P_{\max} の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

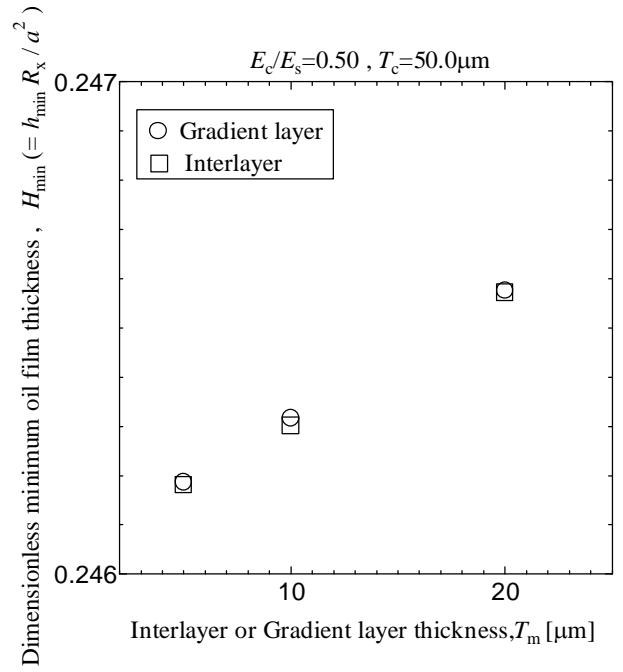


図 5.2 T_m と H_{\min} の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

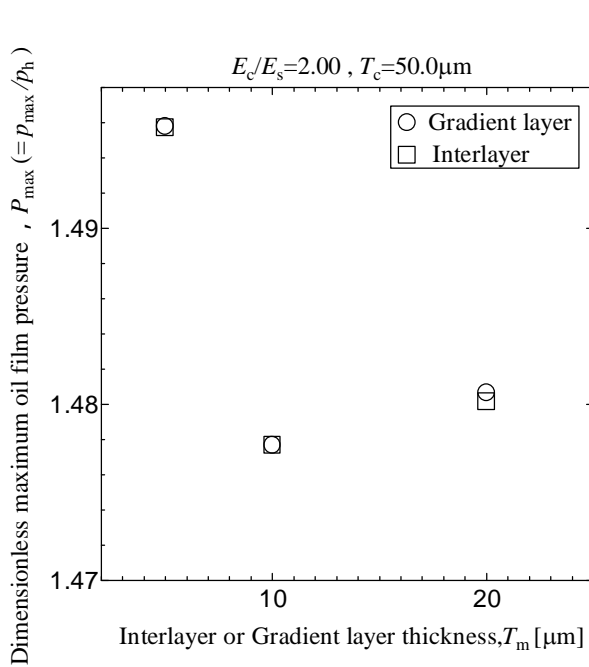


図 5.3 T_m と P_{\max} の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

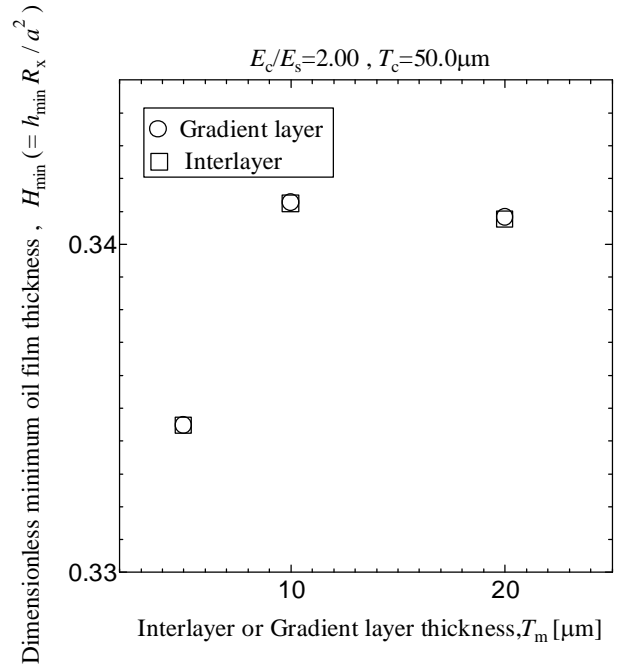


図 5.4 T_m と H_{\min} の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

中間層を用いた場合と傾斜層を用いた場合を比較すると、同一 T_m の場合には中間層を用いた場合のコーティング膜表面の変形量と傾斜層を用いた場合のコーティング膜表面の変形量はほとんど変化しないために P_{\max} および H_{\min} はほとんど変化しない。また P_{\max} および H_{\min} が生じる位置も変化しない。従って、軟質コーティング膜を施した場合と同様に P_{\max} および H_{\min} に対する中間層と傾斜層の違いによる影響は非常に小さいと考える。

5.3 内部応力

中間層を有するコーティング膜と傾斜層を有するコーティング膜について、それぞれコーティング膜、中間層または傾斜層および下地金属内で生じる応力を解析した結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜ともに最大応力値およびその発生位置に対する中間層と傾斜層の違いによる影響は非常に小さい。
- (2) 軟質コーティング膜において、傾斜層を用いると傾斜層内または界面付近で生じる応力を低減することができる。
- (3) 硬質コーティング膜において、傾斜層を用いるとコーティング膜と傾斜層の界面および傾斜層と下地金属の界面に生じる応力勾配を緩和することができる。

以下にその詳細を述べるとともに考察を行う。

5.3.1 軟質コーティング膜における傾斜層の影響 ($E_c/E_s=0.5$ の場合)

図 5.5 ~ 図 5.12 は、厚さ $50.0[\mu\text{m}]$ の軟質コーティング膜を施した場合における、中間層または傾斜層の厚さ T_m と無次元化された各応力の最大値との関係を示す。図 5.5 ~ 図 5.10 の縦軸は各応力の最大値を絶対値で表示している。中間層を用いた場合と傾斜層を用いた場合を比較すると、同一 T_m の場合、各応力の最大値はほとんど変化しない。これは、コーティング膜表面の作用外力となる P_{\max} が中間層を施した場合と傾斜層を施した場合ではほとんど変化しないために生じると考える。

図 5.13 ~ 図 5.18 は、厚さ $50.0[\mu\text{m}]$ の軟質コーティング膜を施した場合における、 $X-Z$ 断面および $Y-Z$ 断面上の $\sigma_{\text{mises}}/p_h$ の分布を示す。図中の \times 印は $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ が生じる位置を示す。中間層を施した場合と傾斜層を施した場合を比較すると、 T_m の値に関係なくどちらの場合においても $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はコーティング膜内で発生しており、 $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ が生じる位置はほとんど変化しない。従って、軟質コーティング膜を施した場合には、最大応力値およびその発生位置に対する中間層と傾斜層の違いによる影響は非常に小さいと考える。しかしながら、 $T_m=5.0[\mu\text{m}]$ の場合において、図 5.13 と図 5.14 を比較すると、中間層を用いた場合、中間層と下地金属との界面付近で $\sigma_{\text{mises}}/p_h=0.61$ の等応力線で示される応力の高い領域が生じるのに対して、傾斜層

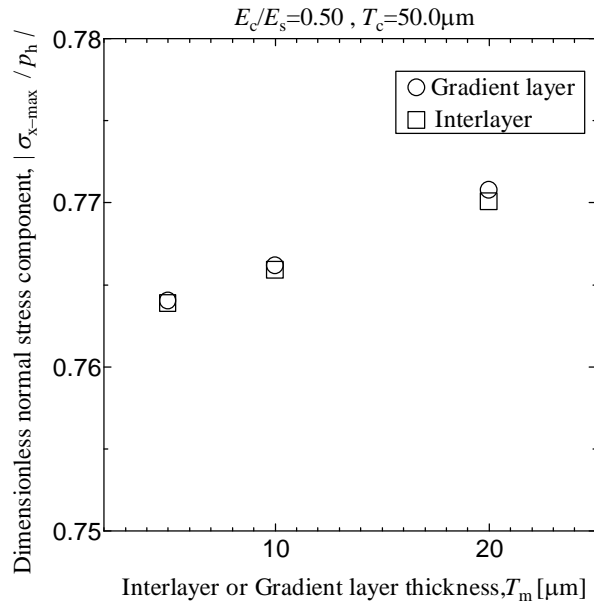


図 5.5 T_m と σ_{x-max} の関係
($T_c=50.0\mu m$, $E_c/E_s=0.50$)

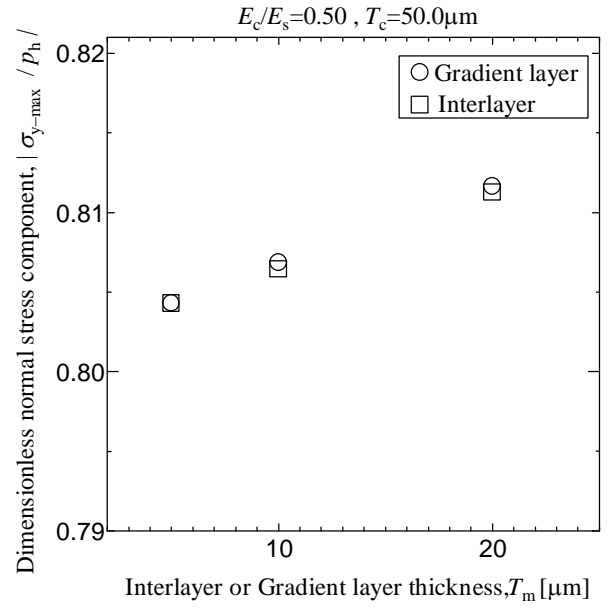


図 5.6 T_m と σ_{y-max} の関係
($T_c=50.0\mu m$, $E_c/E_s=0.50$)

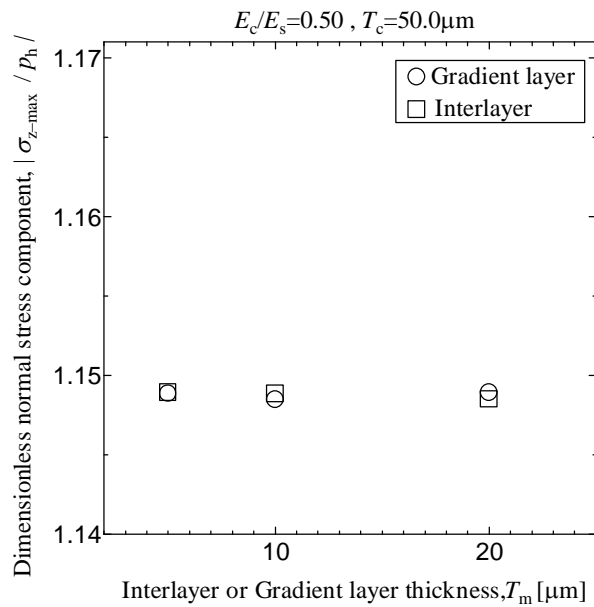


図 5.7 T_m と σ_{z-max} の関係
($T_c=50.0\mu m$, $E_c/E_s=0.50$)

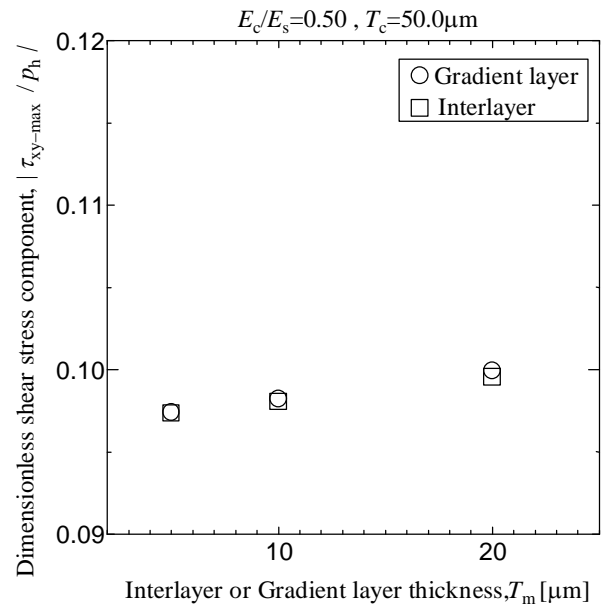


図 5.8 T_m と τ_{xy-max} の関係
($T_c=50.0\mu m$, $E_c/E_s=0.50$)

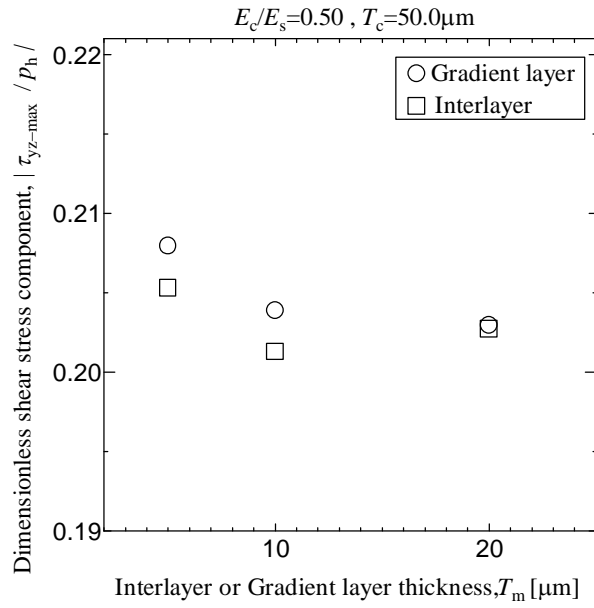


図 5.9 T_m と $\tau_{yz-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

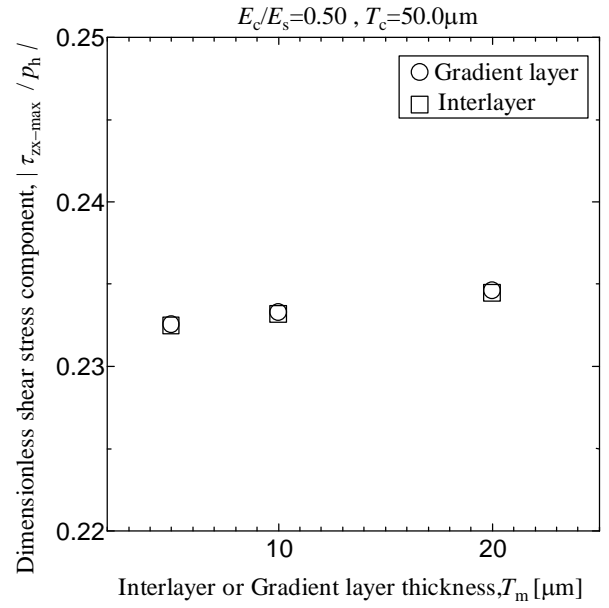


図 5.10 T_m と $\tau_{zx-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

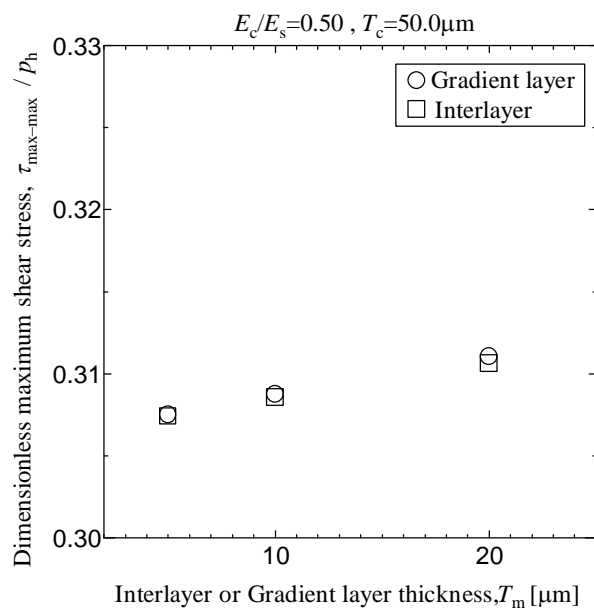


図 5.11 T_m と $\tau_{\max-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

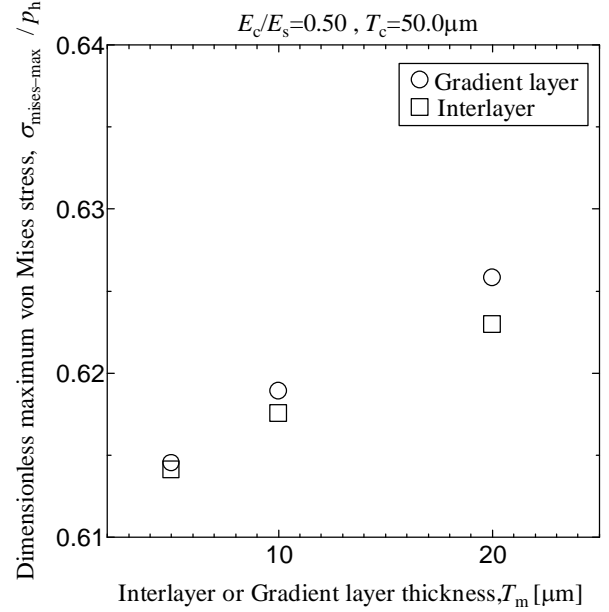
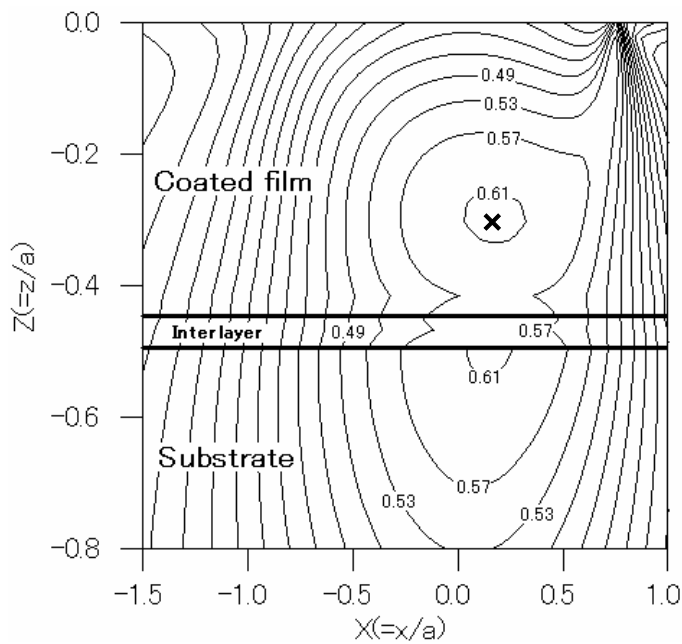
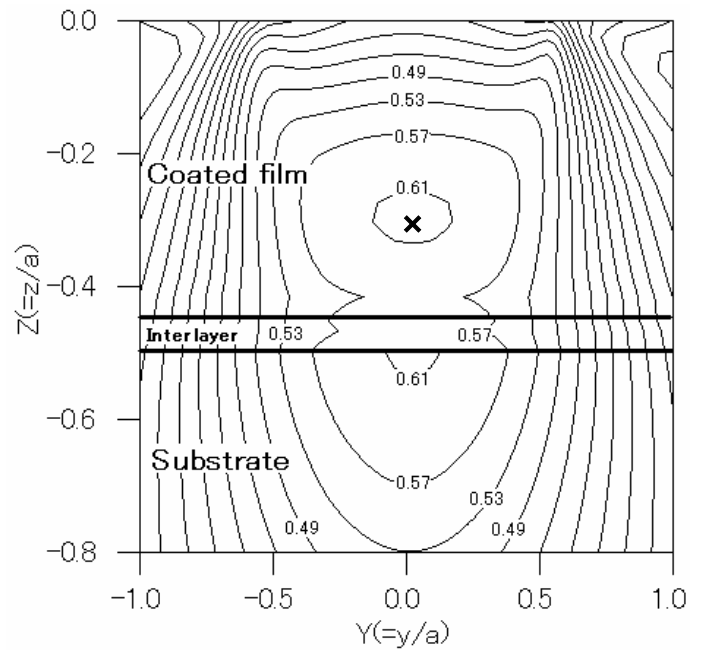


図 5.12 T_m と $\sigma_{\text{mises}-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=0.50$)

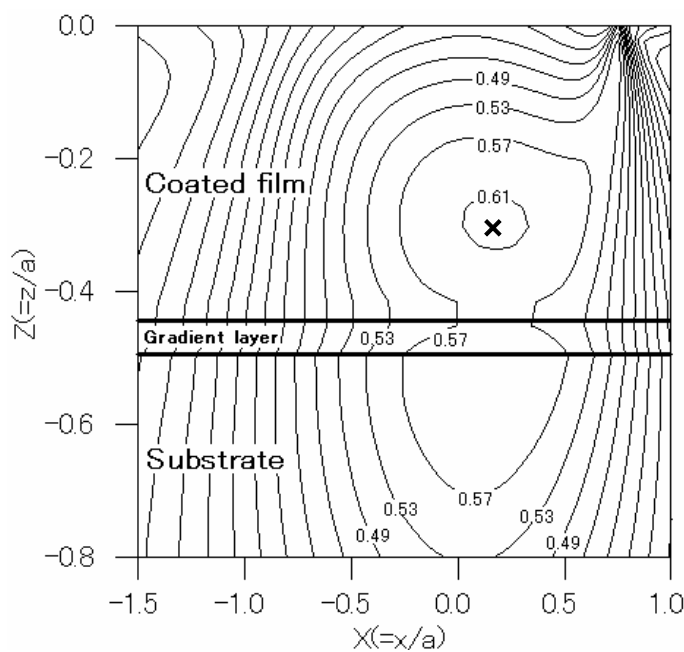


(a) X-Z 平面の分布図

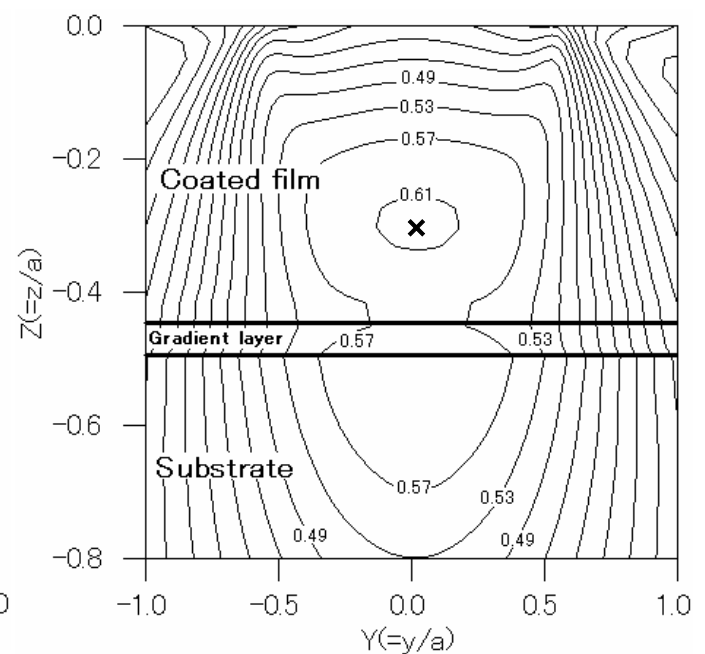


(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.13 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=5.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.75$ (中間層)

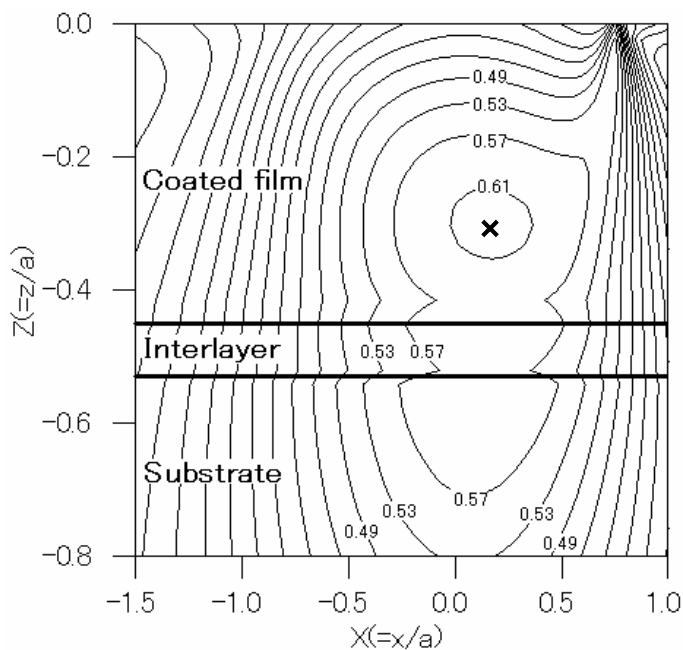


(a) X-Z 平面の分布図

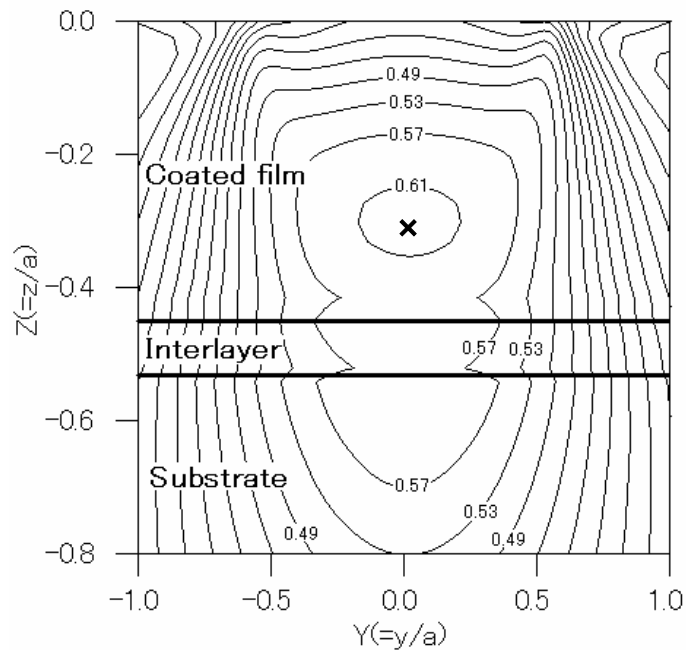


(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.14 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=5.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.50 \sim 1.00$ (傾斜層)

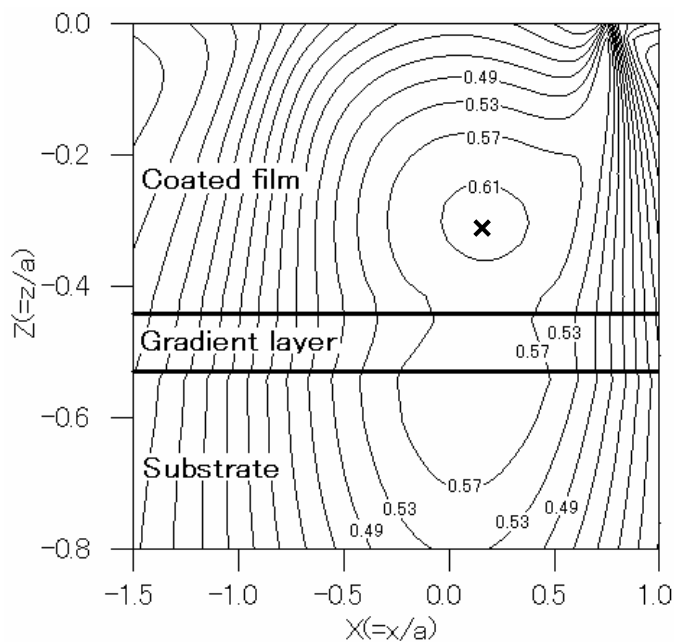


(a) X-Z 平面の分布図

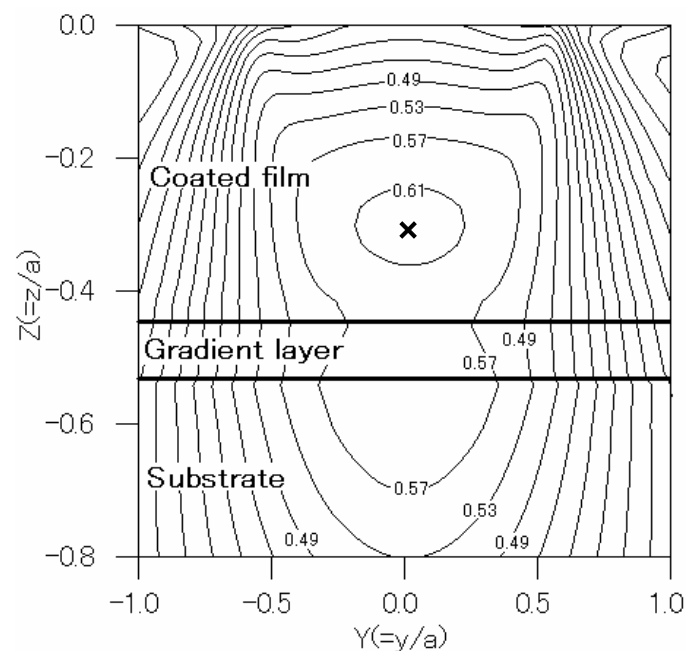


(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.15 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=10.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.75$ (中間層)

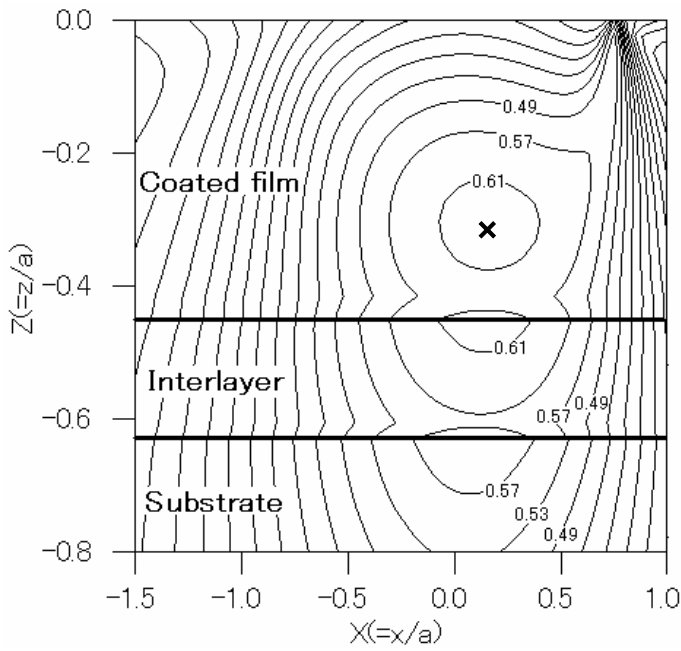


(a) X-Z 平面の分布図

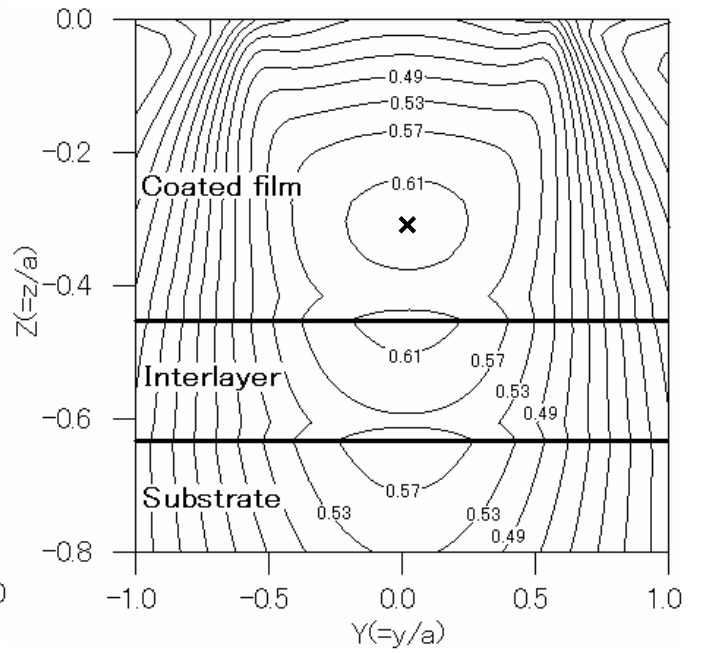


(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.16 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=10.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.50 \sim 1.00$ (傾斜層)

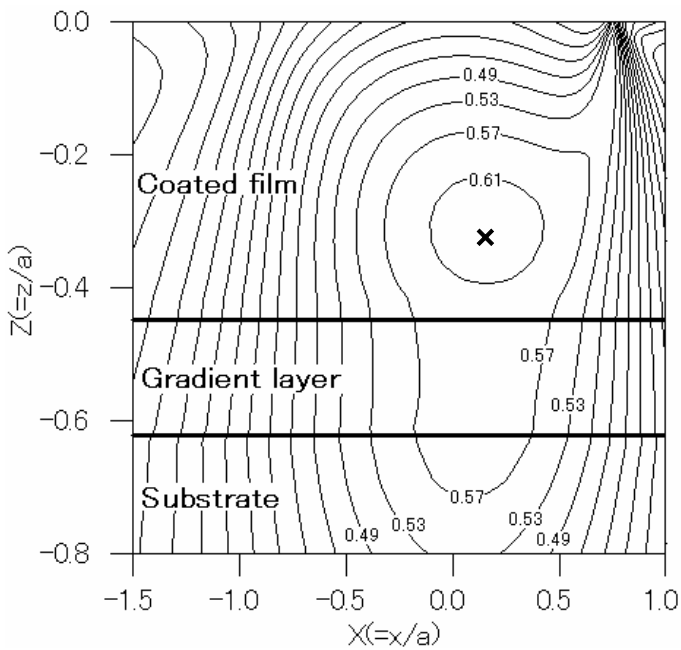


(a) X-Z 平面の分布図

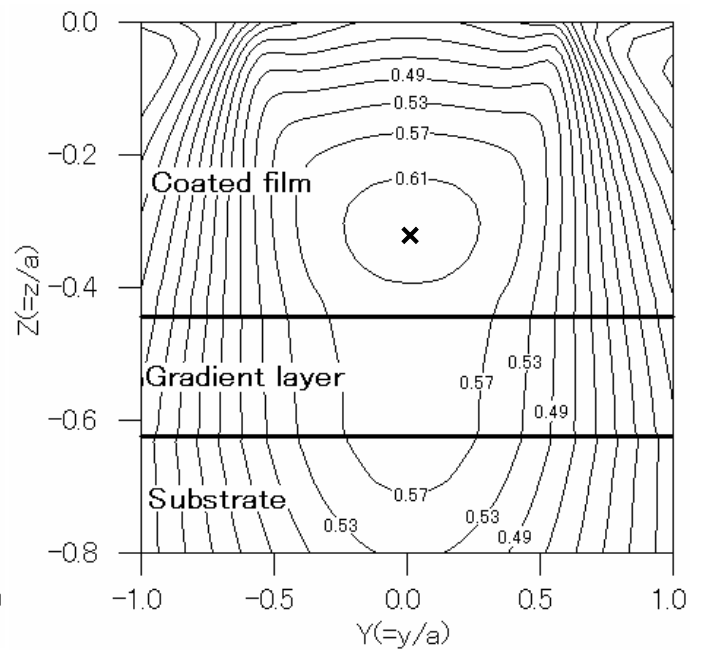


(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.17 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=20.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.75$ (中間層)



(a) X-Z 平面の分布図



(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.18 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=20.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=0.50$, $E_m/E_s=0.50 \sim 1.00$ (傾斜層)

を用いた場合では、中間層と下地金属との界面付近で $\sigma_{\text{mises}}/p_h=0.61$ の等応力線で示される応力の高い領域は生じない。さらに、 $T_m=20.0[\mu\text{m}]$ の場合において、図 5.17 と図 5.18 を比較すると、中間層を用いた場合には $\sigma_{\text{mises}}/p_h=0.61$ の等応力線で示される応力の高い領域がコーティング膜内だけでなく中間層内においても生じるのに対して、傾斜層を用いた場合には、 $\sigma_{\text{mises}}/p_h=0.61$ の等応力線で示される応力の高い領域は傾斜層内では生じない。次に、 $T_m=10.0[\mu\text{m}]$ の場合において、図 5.15 と図 5.16 を比較すると、傾斜層を用いることにより、傾斜層と下地金属との界面付近における応力の変化が小さくなる。

以上のことから、中間層を施した場合と傾斜層を施した場合を比較すると、傾斜層を施すことにより、コーティング膜と傾斜層の界面付近および傾斜層と下地金属の界面付近における応力の変化を小さくすることができ、かつ傾斜層内および界面付近で生じる応力を小さく抑えることが可能である。さらに傾斜層の厚さがより厚くなると、その効果がより大きくなる。しかしながら材料内部で生じる最大応力値およびその発生位置は中間層および傾斜層のどちらを用いてもほとんど変化しない。

5.3.2 硬質コーティング膜における傾斜層の影響 ($E_c/E_s=2.0$ の場合)

図 5.19 ~ 図 5.26 は、厚さ $50.0[\mu\text{m}]$ の硬質コーティング膜を施した場合における、中間層または傾斜層の厚さ T_m と無次元化された各応力の最大値との関係を示す。中間層を用いた場合と傾斜層を用いた場合を比較すると、同一 T_m の場合、軟質コーティング膜を施した場合と同様に、コーティング膜表面の作用外力となる P_{max} がほとんど変化しないために各応力の最大値はほとんど変化しない。

図 5.27 ~ 図 5.32 は、厚さ $50.0[\mu\text{m}]$ の硬質コーティング膜を施した場合における、X-Z 断面および Y-Z 断面上の $\sigma_{\text{mises}}/p_h$ の分布を示す。 $T_m=5.0[\mu\text{m}]$ および $10.0[\mu\text{m}]$ の場合において、図 5.27 と図 5.28 および図 5.29 と図 5.30 をそれぞれ比較すると中間層と傾斜層のどちらを用いても $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はコーティング膜と中間層あるいは傾斜層の界面付近で生じ、その発生位置はほとんど変化しない。一方 $T_m=25.0[\mu\text{m}]$ の場合では、図 5.31 と図 5.32 を比較すると中間層と傾斜層のどちらを用いても $\sigma_{\text{mise-max}}/p_h$ はコーティング膜内の比較的表面に近い箇所で生じ、その発生位置はほとんど変化しない。従って、硬質コーティング膜を施した場合、軟質コーティング膜を施した場合と同様に最大応力値およびその発生位置に対する中間層と傾斜層の違いによる影響は非常に小さいと考える。しかしながら、中間層を用いた場合には、 T_m の値に関係なくコーティング膜と中間層の界面または中間層と下地金属の界面で急激な応力勾配が発生しているのに対して、傾斜層を用いた場合には、界面付近の急激な応力の変化は緩和されている。

以上のことから、中間層を施した場合と傾斜層を施した場合を比較すると、傾斜層を施すことにより、コーティング膜と傾斜層の界面付近および傾斜層と下地金属の界面付近の応力の変化を小さくすることができる。しかしながら材料内部で生じ

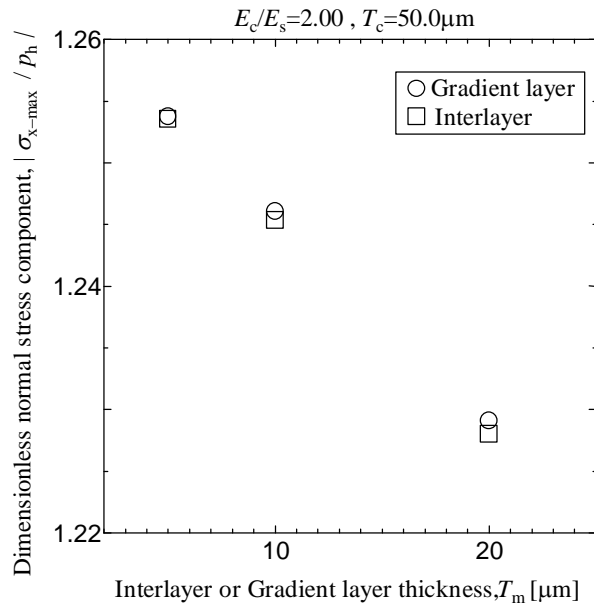


図 5.19 T_m と $\sigma_{x-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

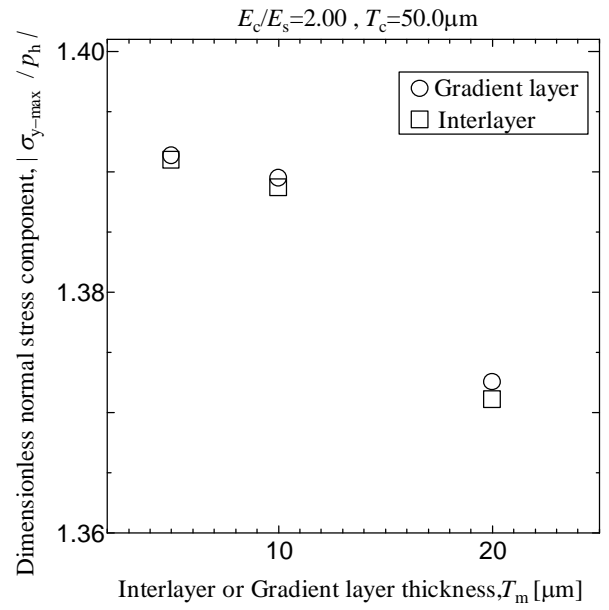


図 5.20 T_m と $\sigma_{y-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

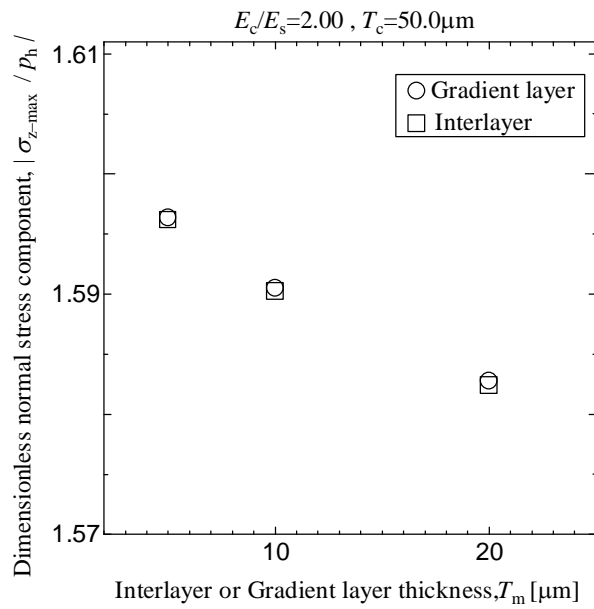


図 5.21 T_m と $\sigma_{z-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

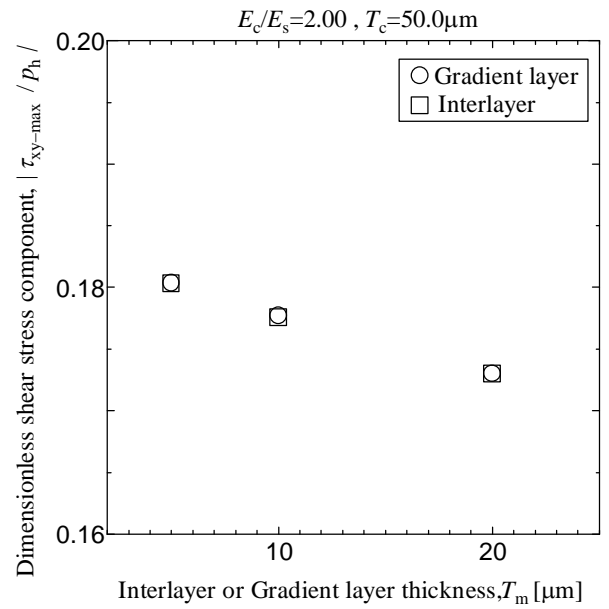


図 5.22 T_m と $\tau_{xy-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

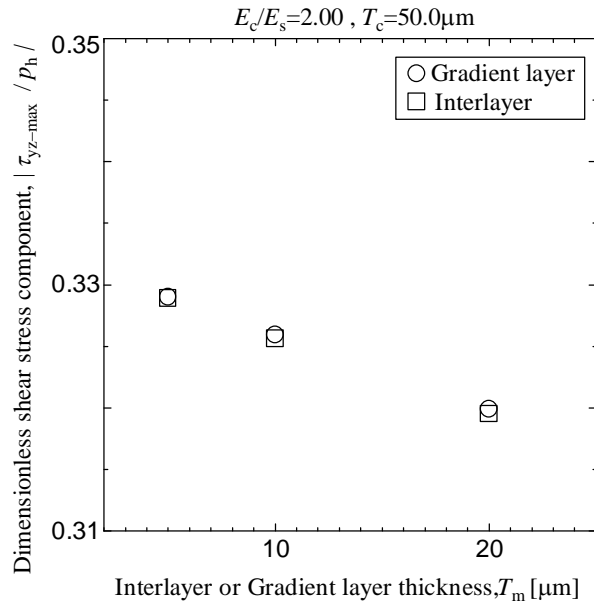


図 5.23 T_m と $\tau_{yz-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

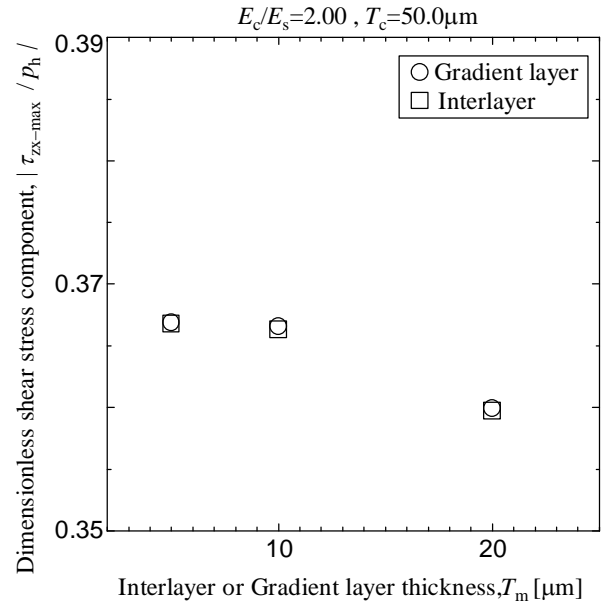


図 5.24 T_m と $\tau_{zx-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

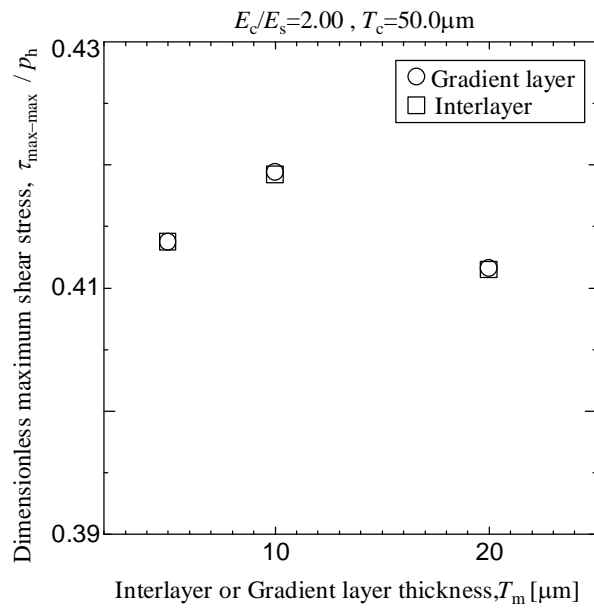


図 5.25 T_m と $\tau_{\max-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

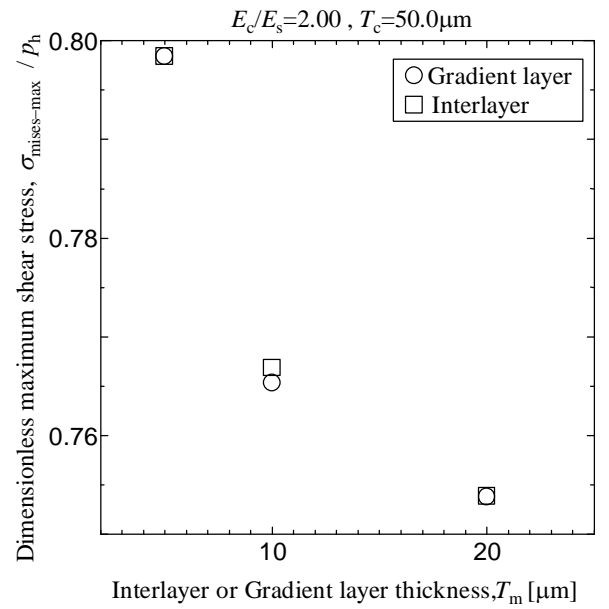
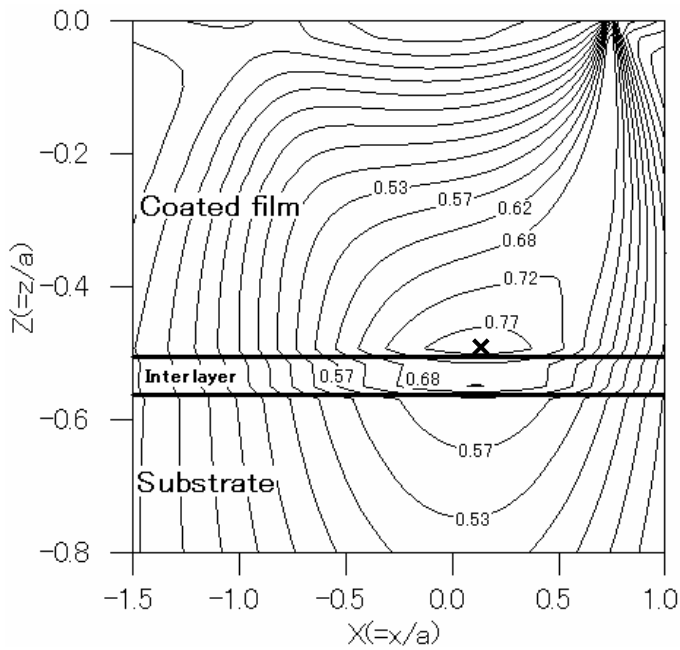
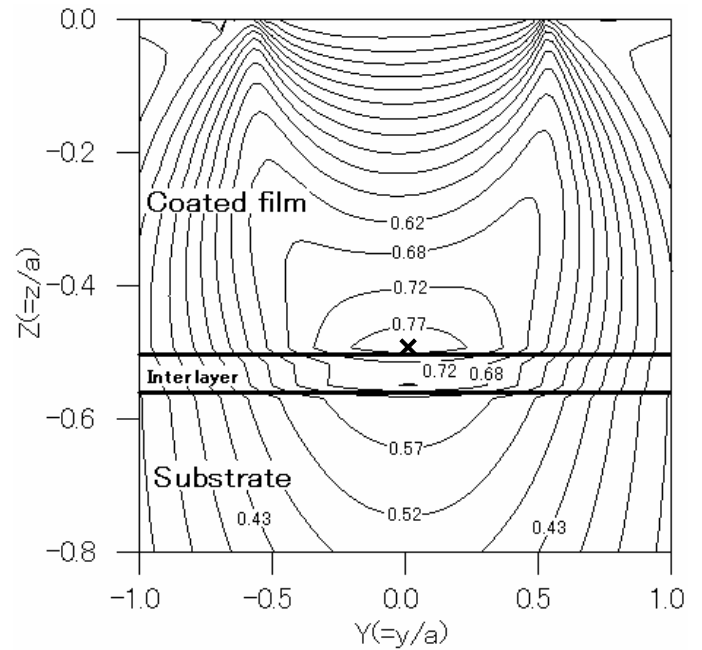


図 5.26 T_m と $\sigma_{\text{mises}-\max}$ の関係
($T_c=50.0\mu\text{m}$, $E_c/E_s=2.00$)

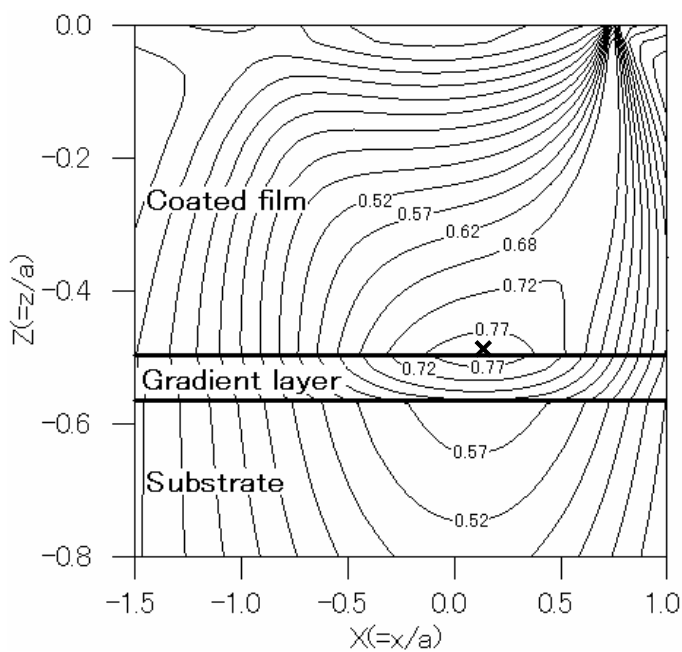


(a) X-Z 平面の分布図

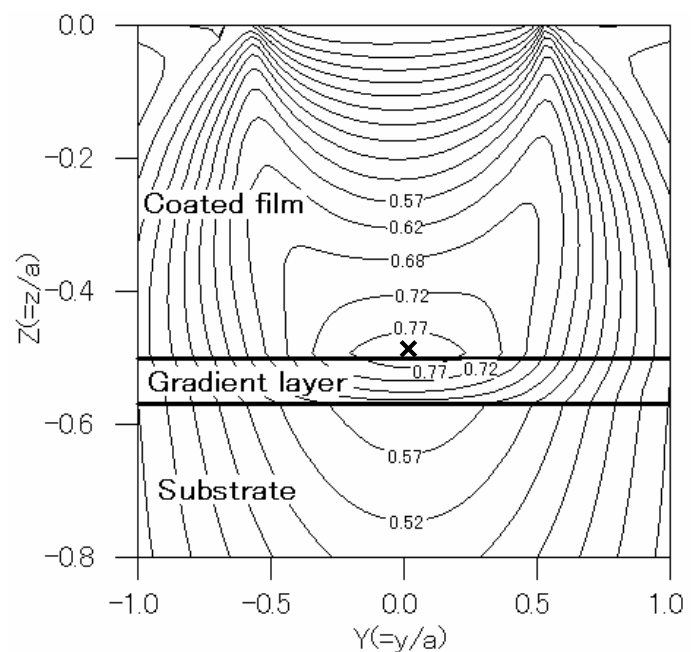


(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.27 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=5.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=1.50$ (中間層)

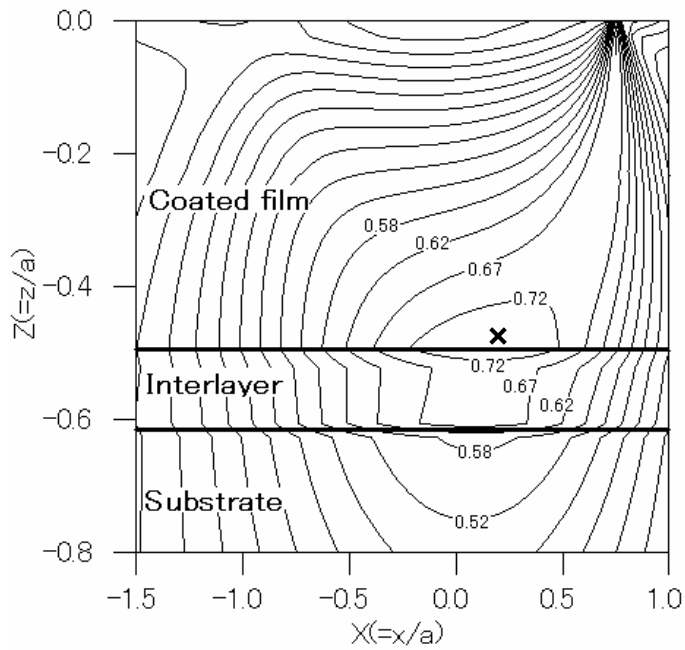


(a) X-Z 平面の分布図

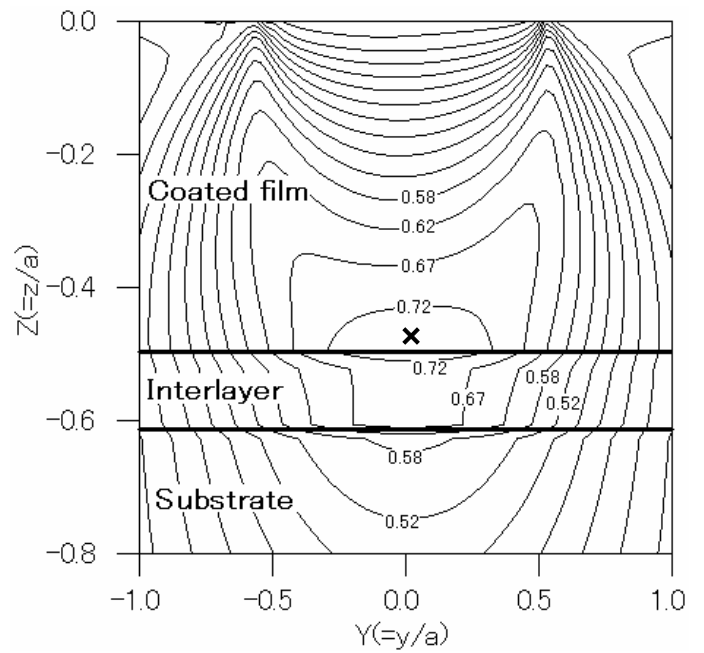


(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.28 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=5.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=1.00 \sim 2.00$ (傾斜層)

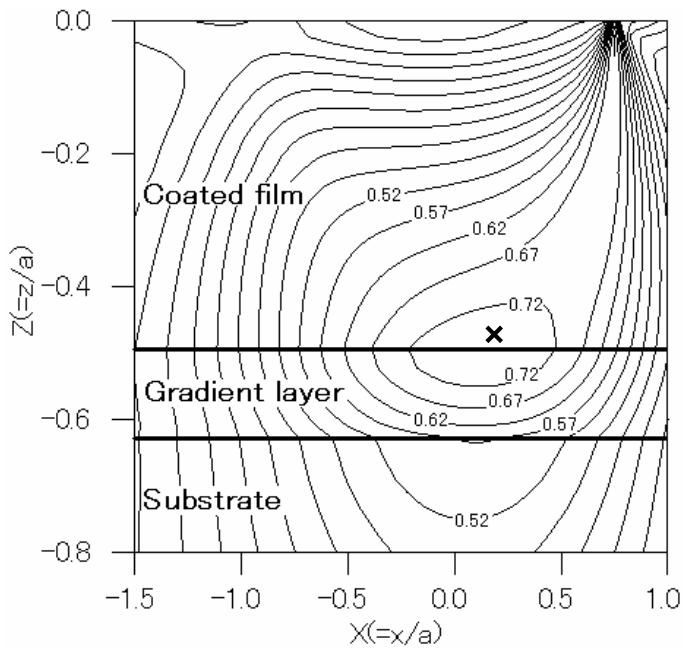


(a) X-Z 平面の分布図

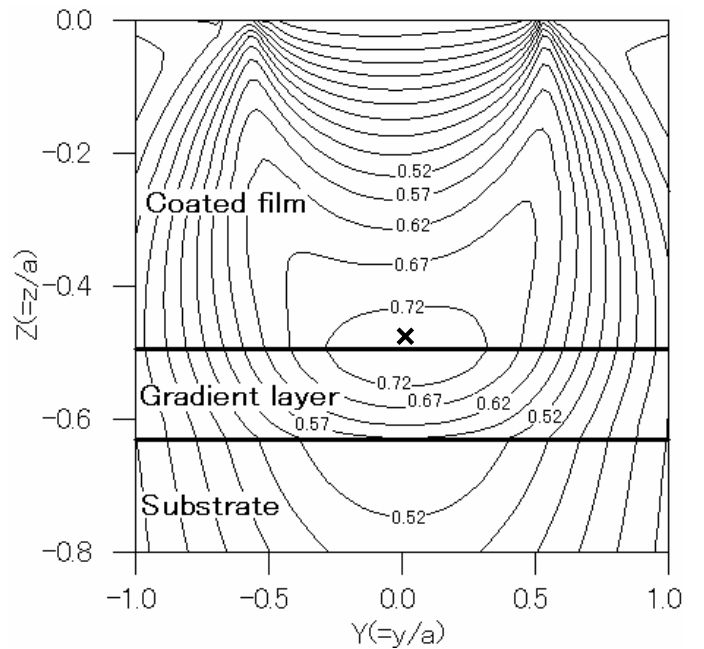


(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.29 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=10.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=1.50$ (中間層)

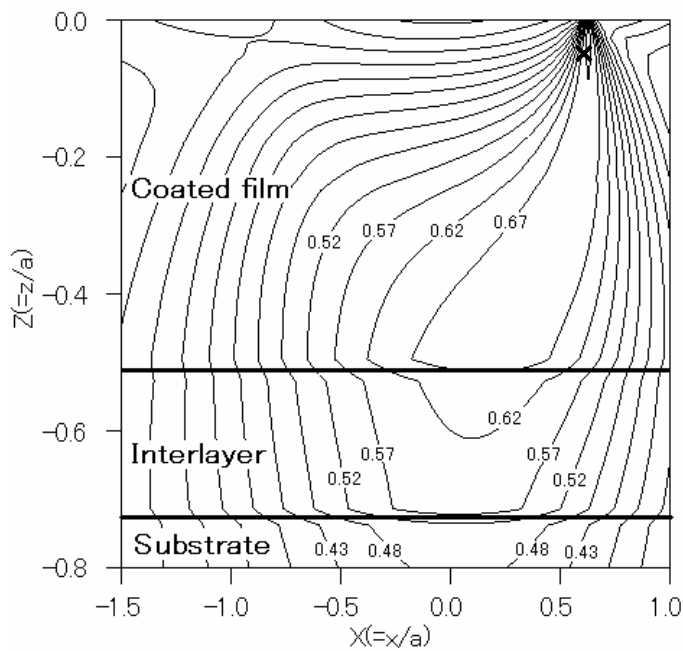


(a) X-Z 平面の分布図

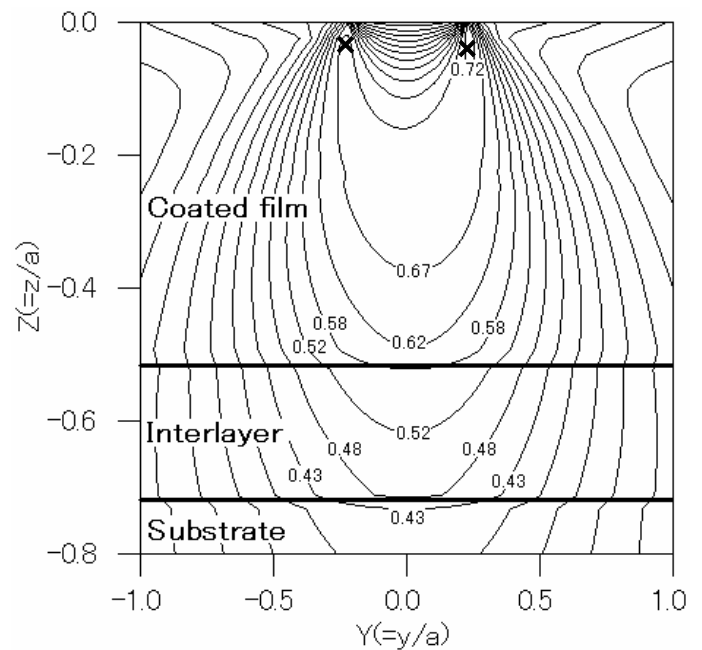


(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.30 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=10.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=1.00 \sim 2.00$ (傾斜層)

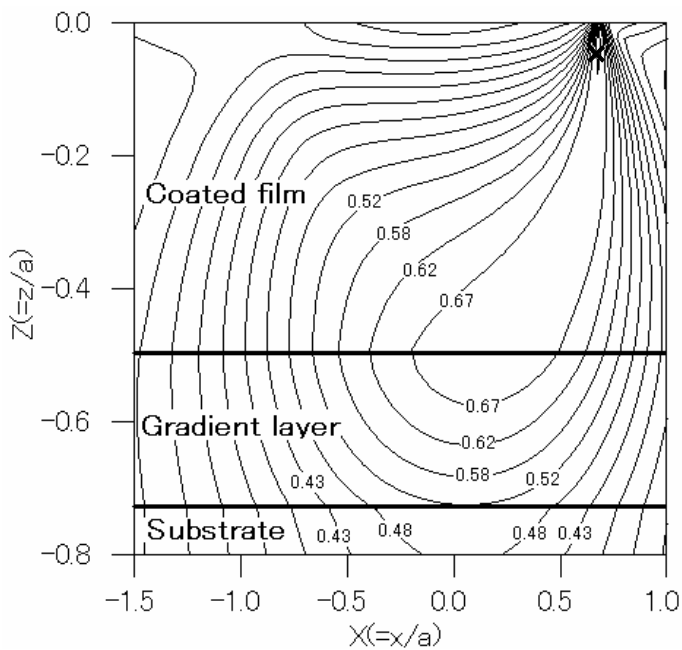


(a) X-Z 平面の分布図

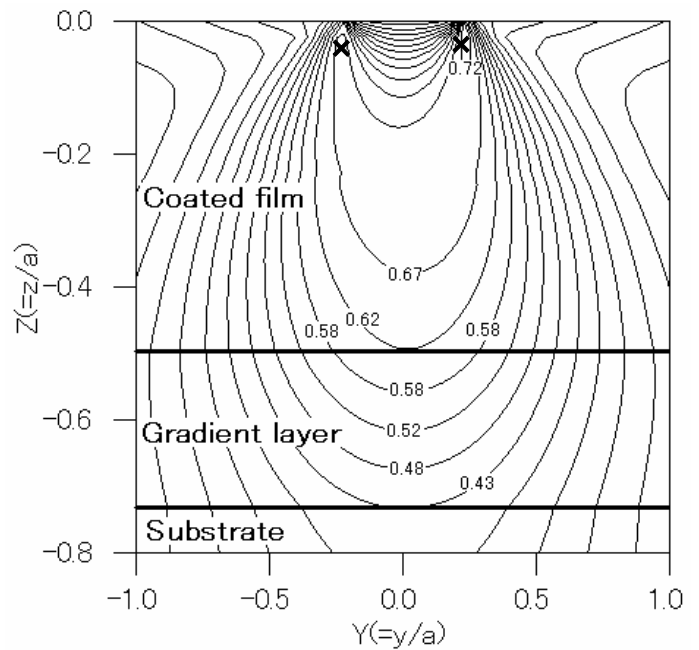


(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.31 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=20.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=1.50$ (中間層)



(a) X-Z 平面の分布図



(b) Y-Z 平面の分布図

図 5.32 σ_{mise}/p_h の分布 : $T_c=50.0[\mu\text{m}]$, $T_m=20.0[\mu\text{m}]$,
 $E_c/E_s=2.00$, $E_m/E_s=1.00 \sim 2.00$ (傾斜層)

る最大応力値およびその発生位置は中間層および傾斜層のどちらを用いてもほとんど変化せず、さらに傾斜層内および下地金属内で生じる応力を小さく抑えることはできない。

5.4 小結

弾性流体潤滑下で点接触している際に使用される中間層または傾斜層を有するコーティング膜に対して、油膜圧力および油膜厚さを二次元解析するとともに、コーティング膜、中間層または傾斜層および下地金属内で生じる応力状態を三次元解析し、主に中間層を用いた場合と傾斜層を用いた場合を比較し考察を行った。本章で得られた結果および考察をまとめると以下ようになる。

- (1) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜ともに、中間層を用いた場合と傾斜層を用いた場合を比較すると、中間層と傾斜層の厚さが同一の場合には中間層を用いた場合のコーティング膜表面の変形量と傾斜層を用いた場合のコーティング膜表面の変形量はほとんど変化しないために無次元最大油膜圧力の値とその発生位置、また無次元最小油膜厚さの値とその発生位置はほとんど変化しない。従って、無次元最大油膜圧力および無次元最小油膜厚さに対する中間層と傾斜層の違いによる影響は非常に小さい。
- (2) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜ともに最大応力値およびその発生位置に対する中間層と傾斜層の違いによる影響は非常に小さい。
- (3) 軟質コーティング膜において、傾斜層を用いると傾斜層内または界面付近で生じる応力を低減することができる。
- (4) 硬質コーティング膜において、傾斜層を用いるとコーティング膜と傾斜層の界面および傾斜層と下地金属の界面に生じる応力勾配を緩和することができる。

付表 5.1 軟質コーティング膜を施した場合の油膜圧力の解析結果

E_c/E_s	T_c	T_m		$P_{\max} (= p_{\max} / p_h)$	P_{\max} の発生位置		$H_{\min} (= h_{\min} R_x / a^2)$	H_{\min} の発生位置	
[-]	[μm]	[μm]		[-]	X [-]	Y [-]	[-]	X [-]	Y [-]
0.5	50.0	5.0	中間層	1.061	0.550	0.375	2.462	0.375	-0.700
0.5	50.0	5.0	傾斜層	1.061	0.550	0.375	2.462	0.375	-0.700
0.5	50.0	10.0	中間層	1.060	0.550	0.375	2.463	0.375	-0.700
0.5	50.0	10.0	傾斜層	1.060	0.550	0.375	2.463	0.375	-0.700
0.5	50.0	20.0	中間層	1.062	0.525	0.400	2.466	0.400	-0.700
0.5	50.0	20.0	傾斜層	1.062	0.525	0.400	2.466	0.400	-0.700

付表 5.2 硬質コーティング膜を施した場合の油膜圧力の解析結果

E_c/E_s	T_c	T_m		$P_{\max} (= p_{\max} / p_h)$	P_{\max} の発生位置		$H_{\min} (= h_{\min} R_x / a^2)$	H_{\min} の発生位置	
[-]	[μm]	[μm]		[-]	X [-]	Y [-]	[-]	X [-]	Y [-]
2.0	50.0	5.0	中間層	1.496	0.575	0.325	3.345	0.375	-0.675
2.0	50.0	5.0	傾斜層	1.496	0.575	0.325	3.345	0.375	-0.675
2.0	20.0	10.0	中間層	1.478	0.550	0.350	3.412	0.375	-0.675
2.0	20.0	10.0	傾斜層	1.478	0.550	0.350	3.413	0.375	-0.675
2.0	10.0	20.0	中間層	1.480	0.550	0.350	3.407	0.375	-0.675
2.0	10.0	20.0	傾斜層	1.481	0.550	0.350	3.408	0.375	-0.675

第6章 コーティング膜の設計指針

本節では本研究で得られた結果をもとに、弾性流体潤滑下で使用されるコーティング膜の設計指針について、中間層および傾斜層がある場合まで拡張し論じる。

弾性流体潤滑下で使用されるコーティング膜に対して、コーティング膜、中間層、傾斜層および下地金属の損傷軽減のためには、コーティング膜、中間層、傾斜層および下地金属内で生じる応力はできる限り小さいことが望ましく、また下地金属を保護する目的で、コーティング膜を施す場合には、材料内部で生じる最大応力は下地金属内で生じるのではなく、コーティング膜内、中間層あるいは傾斜層内で生じることが望ましい。さらに固体面の直接接触による機械要素の損傷を防止するためには、潤滑膜はより厚いほうが望ましい。

本研究の解析結果から得られた上記の要求を満足するコーティング膜の設計指針は以下の通りである。

6. 1 一層のコーティング膜の設計指針

- (1) コーティング膜と下地金属とのヤング率比 E_c/E_s がより小さいほど、材料内部で生じる最大応力値はより小さくなる。従って、下地金属のヤング率 E_s と比較して低いヤング率を持つコーティング膜材を選定することが望ましい。しかし、その場合には、コーティング膜のヤング率 E_c の低下とともに、コーティング膜の強度が低下し、損傷を受ける可能性がある。従って、コーティング膜の損傷を受けない範囲内で、下地金属のヤング率 E_s に比べて、低いヤング率 E_c を持つコーティング膜材を選定することが望ましい。
- (2) コーティング膜厚さ T_c がより大きくなると、最大応力値が生じる位置は下地金属内からコーティング膜内へ移動する。従って、コーティング膜を厚く施す必要がある。しかしながら、必要以上の厚さは採算の面から実用的ではない。また(1)で述べた指針に従い、下地金属のヤング率 E_s と比較して低いヤング率 E_c を持つコーティング膜材を選定した場合、コーティング膜を厚く施すと最大応力値は最小値をとる。以上の観点から、コーティング膜は、応力の最大値がコーティング膜内部で生じ、かつその応力値が強度上耐えうる値以下となるような厚さに施すことが望ましい。
- (3) 上記設計指針(1)の下地金属のヤング率 E_s と比較して低いヤング率 E_c を持つコーティング膜材を用いた場合には、上記設計指針(2)のコーティング膜を厚く施すことにより潤滑膜は厚くなる。従って、上記設計指針(1)および(2)を満足することが重要である。

6. 2 中間層および傾斜層を有するコーティング膜の設計指針

- (1) 軟質コーティング膜を施す場合、コーティング膜の厚さ T_c が比較的小さいときには、中間層と下地金属のヤング率比 E_m/E_s の値が 0.50~1.00 の場合に、最大応力は最小値をもつ。またコーティング膜と下地金属の間にある中間層をより厚く施すことにより、最大応力が生じる位置は下地金属内からコーティング膜内もしくは中間層内へ移動し、 E_m/E_s 値が 0.50~1.00 の場合には、中間層をより厚く施すことにより最小油膜厚さはより大きくなる。従って、コーティング膜の厚さ T_c が比較的小さい場合には、中間層を厚く施し、かつコーティング膜のヤング率 E_c の値と下地金属のヤング率 E_s の値の中間の値をヤング率 E_m として持つ材料を中間層に用いることが望ましい。
- (2) 硬質コーティング膜を施す場合、コーティング膜の厚さ T_c が比較的小さいときには、中間層の厚さ T_m の値に関わらず中間層と下地金属のヤング率比 E_m/E_s の値が 1.00~2.00 の場合に最大応力は最小値をもつ。また中間層の厚さ T_m の値に関わらず最大応力が生じる位置は、コーティング膜内または中間層内で生じる。さらに E_m/E_s 値が 1.00~2.00 の場合、中間層の厚さをより小さくすると最小油膜厚さはより大きくなる。従って、中間層は薄く施すことが望ましいが、中間層を非常に薄く施すと中間層の影響がより小さくなり、最終的に最大応力が生じる位置は下地金属内で生じる可能性がある。以上のことから、コーティング膜の厚さ T_c が比較的小さい場合には、コーティング膜のヤング率 E_c の値と下地金属のヤング率 E_s の値の中間の値をヤング率 E_m として持つ材料を中間層に用いることが望ましい。
- (3) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜を問わず、コーティング膜の厚さ T_c が比較的大きい場合には、コーティング膜と下地金属との間に中間層を施しても、材料内部の最大応力が生じる位置はコーティング膜から移動せず、最大応力値はほとんど変化しない。しかしながら中間層と下地金属のヤング率比 E_m/E_s がより小さいほど最小油膜厚さはより大きくなり、かつ E_m/E_s 値が 1.00 以下の場合に、中間層を厚く施すことにより最小油膜厚さはより大きくなる。従って、下地金属のヤング率 E_s と比較して低いヤング率 E_m を持つ材料を中間層として用いることが望ましく、かつ中間層は厚く施すことが望ましい。
- (4) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜問わず、コーティング膜と下地金属との間に傾斜層を用いた場合、コーティング膜の厚さ T_c に関わらず中間層を用いた場合と比較して、最大応力値は変わらない。しかしながら、コーティング膜と傾斜層の界面付近または傾斜層と下地金属との界面付近における応力値を小さくすることが可能である。また界面付近における応力の変化を小さくすることができ、応力勾配を緩和することが可能である。従って、コーティング膜と下地金属の間には傾斜層を積極的に使用することが望ましい。

第7章 結 論

本研究では、点接触弾性流体潤滑下で使用されるコーティング膜材を対象とし、コーティング膜の最適設計の指針を提案した。本研究で得られた結論は以下に通りである。

1. 点接触弾性流体潤滑下で使用される一層のコーティング膜および、中間層または傾斜層を有するコーティング膜に生じる応力ならびに油膜厚さの解析法を構築した。また構築した解析方法の高い信頼性が評価された。
2. 本研究により構築した解析法を用いて、下地金属上に一層のコーティング膜が施されたモデルに対し、コーティング膜内および下地金属内で生じる応力ならびに油膜厚さを明らかにした。その結果をまとめると以下のようになる。
 - (1) コーティング膜の厚さが一定の場合、コーティング膜のヤング率がより大きくなると、無次元最大油膜圧力および無次元最小油膜厚さはともにより大きくなる。
 - (2) コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合、コーティング膜の厚さがより大きくなると、有次元最大油膜圧力はより大きく、有次元最小油膜厚さはより小さくなる。一方、コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合には、コーティング膜の厚さがより大きくなると有次元最大油膜圧力はより小さく、有次元最小油膜厚さはより大きくなる。
 - (3) コーティング膜の厚さが一定の場合、コーティング膜のヤング率がより大きくなると、コーティング膜および下地金属の内部で生じる最大応力はより大きくなる。
 - (4) コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合、コーティング膜の厚さの増加に伴って、材料内部で生じる von Mises 応力の最大値は、本研究で行った計算の範囲内で最大値を持つ。一方、コーティング膜材のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合には、コーティング膜の厚さの増加に伴って、材料内部で生じる von Mises 応力の最大値は、本研究で行った計算の範囲内で最小値を持つ。
 - (5) コーティング膜のヤング率が一定の場合、コーティング膜が厚くなると、von Mises 応力の最大値が生じる位置は下地金属内からコーティング膜内へ移動する。

3. さらに本研究により構築した解析法を用いて、下地金属とコーティング膜の間に中間層および傾斜層を有するモデルに対し、コーティング膜、中間層、傾斜層および下地金属で生じる応力ならびに油膜厚さを明らかにした。その結果をまとめると以下のようなになる。
- (1) 軟質コーティング膜 ($E_c/E_s=0.5$) および硬質コーティング膜 ($E_c/E_s=2.0$) に関わらず、中間層のヤング率がより大きくなると、有次元最小油膜厚さはより小さくなる。
 - (2) 軟質コーティング膜を施した場合には、中間層のヤング率が下地金属のヤング率より低い場合、中間層の厚さがより大きくなると、有次元最小油膜厚さはより大きくなるのに対して、硬質コーティング膜を施した場合には中間層の厚さがより大きくなると、有次元最小油膜厚さはより小さくなる。一方、中間層のヤング率が下地金属のヤング率より高い場合には、軟質コーティング膜を施した場合には、中間層の厚さがより大きくなると、有次元最小油膜厚さはより小さくなるのに対して、硬質コーティング膜を施した場合には有次元最小油膜厚さはより大きくなる。
 - (3) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜に関わらず、中間層のヤング率がより大きくなると、コーティング膜の厚さが比較的薄い場合には材料内部で生じる **von Mises** 応力の最大値は計算された条件の範囲内で最小値を生じる。一方、コーティング膜の厚さが比較的厚い場合には **von Mises** 応力の最大値はほとんど変化しない。
 - (4) 軟質コーティング膜を施した場合、コーティング膜の厚さが比較的薄い場合には、中間層の厚さを大きくすると、**von Mises** 応力の最大値が生じる位置は、中間層と下地金属との界面付近に移動するのに対して、硬質コーティング膜を施した場合には、コーティング膜、中間層および下地金属のうちヤング率が一番高い材料の内部で生じる。コーティング膜の厚さが比較的厚い場合には、軟質コーティング膜および硬質コーティング膜問わず、中間層の厚さに関係なく、**von Mises** 応力の最大値はコーティング膜内部で生じる。
 - (5) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜ともに、無次元最大油膜圧力、無次元最小油膜厚さおよび最大応力値とその発生位置に対する中間層と傾斜層の違いによる影響は非常に小さい。
 - (6) 軟質コーティング膜において、傾斜層を用いると中間層内または界面付近で生じる応力を低減することができる。また硬質コーティング膜において、傾斜層を用いるとコーティング膜と中間層の界面および中間層と下地金属の界面に生じる応力勾配を緩和することができる。
4. 点接触弾性流体潤滑下で使用される一層のコーティング膜の設計指針を提案した。その提案した設計指針は以下の通りである。

- (1) コーティング膜の損傷を受けない範囲内で、下地金属のヤング率に比べて、低いヤング率を持つコーティング膜材を選定することが望ましい。
 - (2) (1)で述べた指針に従い、下地金属のヤング率に比べて低いヤング率を持つコーティング膜材を選定した場合、コーティング膜の厚さは、応力の最大値がコーティング膜内部で生じ、且つその応力値が強度上耐えうる値以下となるように施すことが望ましい。
5. さらにコーティング膜と下地金属の間に中間層および傾斜層を施す場合の設計指針を提案した。その提案した設計指針は以下の通りである。
- (1) 軟質コーティング膜および硬質コーティング膜問わず、コーティング膜のヤング率の値と下地金属のヤング率の値の中間の値をヤング率として持つ材料を中間層に用いることが望ましい。また中間層を厚く施すことが望ましい。
 - (2) コーティング膜と下地金属との間には傾斜層を積極的に使用することが望ましい。

謝 辞

本研究の遂行および本論文の完成に至るまで、お忙しい中長期間にわたり、終始懇篤なるご指導とご鞭撻を賜った東京海洋大学海洋工学部教授岩本勝美先生に謹んで感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり有益なるご助言、ご指導をいただきました東京海洋大学海洋工学部教授志摩政幸先生に深く感謝申し上げます。

本論文の作成にあたり、有益なご指導、ご教示をいただきました東京海洋大学海洋工学部教授和泉充先生、東京海洋大学海洋工学部准教授井上順広先生に深謝申し上げます。

本研究の遂行にあたり研究環境を整備してくださり、また本論文の作成にあたり有益なご指摘、ご教示をいただきました東京海洋大学海洋工学部准教授田中健太郎先生に厚く御礼申し上げます。

また、有益なご指摘、ご教示を与えてくださり、いつも温かく励まして頂いた広島商船高等専門学校商船学科教授瀧口三千弘先生に心から感謝の意を表します。

さらに、本研究を遂行するにあたって広島商船高等専門学校の教職員の皆様には、多大なご協力とご援助をいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり惜しみないご協力をいただきました東京海洋大学海洋工学部大石誠治助手および外山一雄技官に厚くお礼申し上げます。また共に励まし合い研究を行った東京海洋大学大学院生小林慶子さん、阿久澤憲仁君、小杉康太君、宮崎悠造君、熱川慧君、浅見文彦君に厚くお礼申し上げます。

最後に、長きにわたる学生生活をこれまで支えてくれた両親に心より感謝いたします。

付録1 (2.36) 式および (2.37) 式の導出

図 2.7 に示す，分割された四面体要素の i, j, m, p 上にある節点の変位状態は，各座標 x, y, z 方向の 3 つの無次元変位成分 u, v, w によって定義する．

仮定により四面体要素の変位は，次式で示される．

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z \\ v &= \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y + \beta_4 z \\ w &= \gamma_1 + \gamma_2 x + \gamma_3 y + \gamma_4 z \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

(A.1) 式に四面体の節点座標を代入すると (A.2) 式を得る．

$$\begin{aligned} u_i &= \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i + \alpha_4 z_i \\ u_j &= \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j + \alpha_4 z_j \\ u_m &= \alpha_1 + \alpha_2 x_m + \alpha_3 y_m + \alpha_4 z_m \\ u_p &= \alpha_1 + \alpha_2 x_p + \alpha_3 y_p + \alpha_4 z_p \\ v_i &= \beta_1 + \beta_2 x_i + \beta_3 y_i + \beta_4 z_i \\ v_j &= \beta_1 + \beta_2 x_j + \beta_3 y_j + \beta_4 z_j \\ v_m &= \beta_1 + \beta_2 x_m + \beta_3 y_m + \beta_4 z_m \\ v_p &= \beta_1 + \beta_2 x_p + \beta_3 y_p + \beta_4 z_p \\ w_i &= \gamma_1 + \gamma_2 x_i + \gamma_3 y_i + \gamma_4 z_i \\ w_j &= \gamma_1 + \gamma_2 x_j + \gamma_3 y_j + \gamma_4 z_j \\ w_m &= \gamma_1 + \gamma_2 x_m + \gamma_3 y_m + \gamma_4 z_m \\ w_p &= \gamma_1 + \gamma_2 x_p + \gamma_3 y_p + \gamma_4 z_p \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

(A.2) 式から $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ ($i=1 \sim 4$) を求めると，(A.3) 式を得る．

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{1}{6V} (b_i u_i + b_j u_j + b_m u_m + b_p u_p) \\ \alpha_3 &= \frac{1}{6V} (c_i u_i + c_j u_j + c_m u_m + c_p u_p) \\ \alpha_4 &= \frac{1}{6V} (d_i u_i + d_j u_j + d_m u_m + d_p u_p) \\ \beta_2 &= \frac{1}{6V} (b_i v_i + b_j v_j + b_m v_m + b_p v_p) \\ \beta_3 &= \frac{1}{6V} (c_i v_i + c_j v_j + c_m v_m + c_p v_p) \\ \beta_4 &= \frac{1}{6V} (d_i v_i + d_j v_j + d_m v_m + d_p v_p) \\ \gamma_2 &= \frac{1}{6V} (b_i w_i + b_j w_j + b_m w_m + b_p w_p) \\ \gamma_3 &= \frac{1}{6V} (c_i w_i + c_j w_j + c_m w_m + c_p w_p) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

$$\gamma_4 = \frac{1}{6V}(d_i w_i + d_j w_j + d_m w_m + d_p w_p)$$

(A.3)式中の各項は、行列式で表すと(A.4)式のように示される.

$$\begin{aligned}
 b_i &= -\det \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_m & z_m \\ 1 & y_p & z_p \end{vmatrix} & b_j &= \det \begin{vmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_m & z_m \\ 1 & y_p & z_p \end{vmatrix} \\
 b_m &= -\det \begin{vmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_p & z_p \end{vmatrix} & b_p &= \det \begin{vmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_m & z_m \end{vmatrix} \\
 c_i &= \det \begin{vmatrix} 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_m & z_m \\ 1 & x_p & z_p \end{vmatrix} & c_j &= -\det \begin{vmatrix} 1 & x_i & z_i \\ 1 & x_m & z_m \\ 1 & x_p & z_p \end{vmatrix} \\
 c_m &= \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & z_i \\ 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_p & z_p \end{vmatrix} & c_p &= -\det \begin{vmatrix} 1 & x_i & z_i \\ 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_m & z_m \end{vmatrix} \\
 d_i &= -\det \begin{vmatrix} 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \\ 1 & x_p & y_p \end{vmatrix} & d_j &= \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_m & y_m \\ 1 & x_p & y_p \end{vmatrix} \\
 d_m &= -\det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_p & y_p \end{vmatrix} & d_p &= \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix} \\
 6V &= \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_m & y_m & z_m \\ 1 & x_p & y_p & z_p \end{vmatrix}
 \end{aligned} \tag{A.4}$$

弾性理論により、三次元解析に必要な六つのひずみ成分の算出式は(A.5)式のように示される.

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha_2 \\ \beta_3 \\ \gamma_4 \\ \beta_2 + \alpha_3 \\ \gamma_3 + \beta_4 \\ \alpha_4 + \gamma_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

(A.3)式中の各 α , β , γ を(A5)式に代入し, マトリクス表示をすると(2.37)式を得る.

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_m & b_p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_i & c_j & c_m & c_p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_i & d_j & d_m & d_p \\ c_i & c_j & c_m & c_p & b_i & b_j & b_m & b_p & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_i & d_j & d_m & d_p & c_i & c_j & c_m & c_p \\ d_i & d_j & d_m & d_p & 0 & 0 & 0 & 0 & b_i & b_j & b_m & b_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_m \\ u_p \\ v_i \\ v_j \\ v_m \\ v_p \\ w_i \\ w_j \\ w_m \\ w_p \end{Bmatrix}$$

$$= [B]\{u\} \quad (2.37)$$

応力とひずみの関係式は(2.36)式のように示される.

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\kappa)}{(1-\kappa)(1-2\kappa)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\kappa}{1-\kappa} & \frac{\kappa}{1-\kappa} & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & \frac{\kappa}{1-\kappa} & 0 & 0 & 0 \\ & & 1 & 0 & 0 & 0 \\ & (sym) & & \frac{1-2\kappa}{2(1-\kappa)} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\kappa}{2(1-\kappa)} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\kappa}{2(1-\kappa)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}$$

$$= [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{u\} \quad (2.36)$$

付録2 コーティング膜材のヤング率測定

2. 1 はじめに

本研究で確立した内部応力および油膜厚さの解析方法を用いて、コーティング膜および下地金属内で生じる応力ならびに油膜厚さを解析し評価を行うためには、コーティング膜材の機械的特性の一つであるヤング率が必要となる。

従来、コーティング膜のヤング率は、ナノインデント^[A.1]、三点曲げ試験^[A.2]、複合膜メンブレンの圧力-たわみ測定^[A.3]などにより得られている。しかしながらこれらの方法には一長一短があり、また必ずしも容易ではない。そこで本研究では、組み合わせはりの原理を用いてコーティング膜のヤング率を得ることを試みた。

本付録では、組み合わせはりの原理^[A.4]を用いて、実際のコーティング膜材のヤング率を求める手法を確立する事を目的とし、その手法によりコーティング膜のヤング率を求め、他の研究^[A.5]において得られたコーティング膜材のヤング率データと比較検討を行い、本研究で用いた手法が実際のコーティング膜材のヤング率評価に適用可能である事を検証した結果について報告する。

2. 2 実験装置

2. 2. 1 実験装置の概要

組み合わせはりの原理を用いてコーティング膜材のヤング率を得るためには、コーティング膜材に荷重を負荷した時に生じるひずみ量を測定する必要がある。

そこで本研究では、下地金属上にコーティング膜が施された試験片を用意し、試験片の一端を固定し、他端に荷重 W をかけ、そのときに生じるひずみを試験片に接着したひずみゲージにより測定する。本研究で製作したコーティング膜のヤング率測定装置の全体図を付図 2.1 に示す。ここで、 X 方向、 Y 方向および Z 方向は、付図 2.1 に示す通りである。

2. 2. 2 実験装置に使用した機器

試験片に荷重を負荷した場合にコーティング膜表面に生じるひずみ量を測定するために使用した機器は以下の通りである。

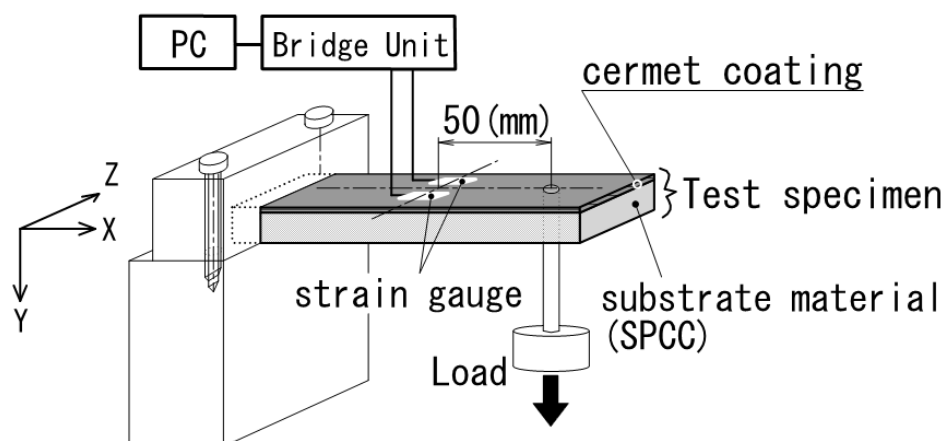
(1) ひずみゲージ

形式： KYOWA 製 KFG-02-120-C1-23L1M2R

ゲージ長さ： 0.2[mm]

ゲージ抵抗(24℃、湿度 50%時)： 120.0±0.8 Ω

ゲージ率(24℃、湿度 50%時)： 2.22±1.0%



付図 2.1 ヤング率測定装置の全体図

使用温度範囲： -30～120℃

(2) ひずみ測定器

形式： KYOWA 製 DBU-120A KYOWA 製 KFG-02-120-C1-23L1M2R

本実験で使用したひずみ測定器はブリッジ回路・アンプ・A-D 変換機を内蔵しており、容易にひずみゲージを接続できる。またパソコンと USB ケーブルで接続することにより、得られたひずみ量をパソコン上に表示することが可能である。

2. 3 試験片

コーティング膜が薄い場合には、下地金属のみに荷重を負荷した際に生じるひずみ量とコーティング膜を施した際に生じるひずみ量との差が小さく、その差が測定誤差に含まれる可能性がある。そのために、ひずみ量の差が測定誤差以上になるような厚さのコーティング膜を対象に実験を行う。

以上の観点から本研究では、成膜速度が早く、比較的安価に厚い膜を生成可能な溶射法により成膜されたサーメット溶射皮膜を用いてヤング率を測定する。

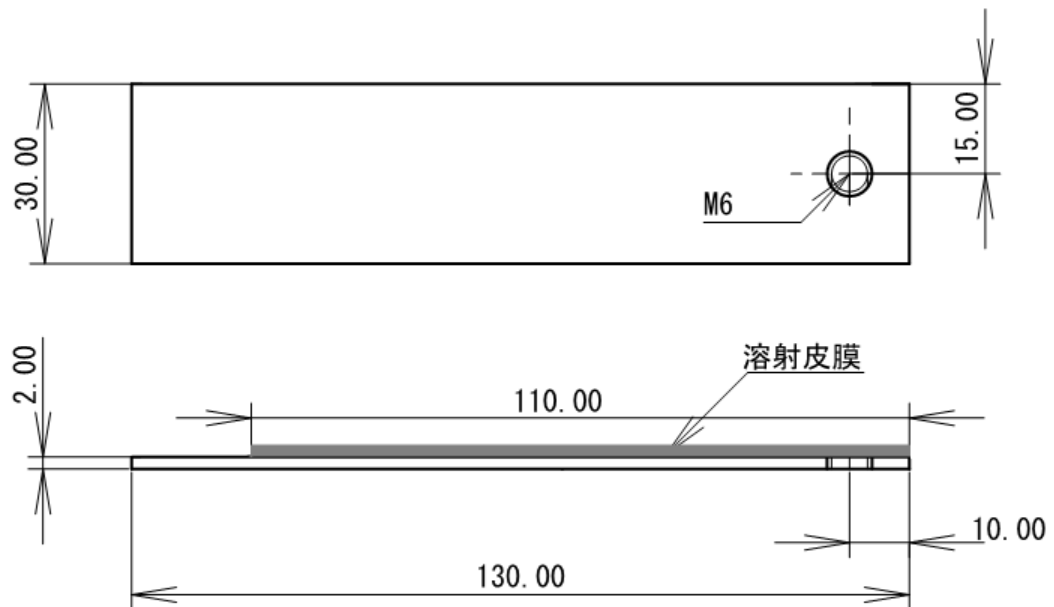
溶射法は金属・合金、セラミックスおよびこれらの混合物であるサーメットを高温のガス炎やプラズマ環境中に投入し、熔融もしくは軟化させ、微粒子状にして母材表面に高速で噴きつけて扁平に潰れた粒子を凝固、堆積させることにより成膜する方法で、成膜が速く、様々な材料を複合化できる点など優れた特徴を多く持つ。また摩耗特性の改善や耐食性、耐熱性の向上を図るために用いられている。

2. 3. 1 溶射材料

本研究では、HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) 溶射法により成膜された WC/12%Co 膜と $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\%\text{NiCr}$ 膜の二種類のサーメット溶射皮膜のヤング率を測定する。本研究で用いた WC/12%Co と $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\%\text{NiCr}$ の詳細を付表 2.1 に示す。下地金属には冷間圧延鋼帯 (SPCC) を用いた。一般的に WC/12%Co 膜は、高硬度、高靱性であり耐摩耗性に優れ、 $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\%\text{NiCr}$ 膜は、耐高温腐食性および耐高温摩耗性に優れる特徴を持つ^[A. 6]。

2. 3. 2 形状

試験片の概略図を付図 2.2 に示す。下地金属の長さ 130[mm]のうち 110[mm]に溶射皮膜を施し、残りの 20[mm]は試験片を固定するための部分である。ひずみゲージは荷重を負荷する位置から $L=50[\text{mm}]$ の箇所に接着する(付図 2.1)。WC/12%Co 膜の厚さは 122～127[μm]、 $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\%\text{NiCr}$ 膜の厚さは 106～110[μm]である。



付図 2.2 試験片の概略図

付表 2.1 本研究で用いたサーメット溶射皮膜の詳細

Coating material	Particle size (μm)	Chemical composition (wt.%)					
		W	Co	Cr	Ni	C	Fe
WC/12%Co	5.0 ~ 25.0	Bal.	12.6			5.4	0.1
Cr_3C_2 /25%NiCr	5.0 ~ 30.0			Bal.	22.2	9.8	0.2

2. 4 実験方法

本節では、本研究で用いたコーティング膜材のヤング率測定方法について述べる。

2. 4. 1 下地金属およびコーティング膜のひずみ量測定手順

実験条件は以下の通りである。

負荷荷重 $W[N]$: 7.8, 9.8, 11.8, 13.8, 15.8.

荷重の負荷位置からひずみゲージの中心までの距離 $L[mm]$: 50.

以下の手順により下地金属表面およびコーティング膜表面のひずみ量を測定する。

1. 下地金属のみの試験片を用意し、荷重の負荷位置からひずみゲージの中心までの距離 $L=50[mm]$ の位置に、試験片の中心に対して左右対称にひずみゲージを1枚ずつ接着し6時間乾燥させる。
2. パソコンとひずみ測定器を USB ケーブルで接続する。
3. 試験片を固定ブロックで固定し、ひずみゲージとひずみ測定器をブリッジボックスを介して接続する。
4. 無負荷時におけるひずみ量の原点を定める。
5. 負荷を 7.8N かける。ひずみ量が安定するまで1分間測定する。
6. 荷重は、コーティング膜および下地金属の弾性限度内の 7.8N から 15.8N を負荷し、各負荷に対するひずみ量をそれぞれ1分間測定する。
7. 負荷を 15.8N から 7.8N まで 2.0N 毎に除荷し、除荷時における各負荷のひずみ量をそれぞれ1分間測定する。測定を終了する。
8. 得られた下地金属およびコーティング膜のひずみ量から、組み合わせはりの原理を用いて解析を行い、下地金属およびコーティング膜のヤング率を得る。

2. 4. 2 下地金属およびコーティング膜のヤング率解析

本研究では、実験により得られた下地金属およびコーティング膜のひずみ量から、組み合わせはりの原理を用いて下地金属およびコーティング膜のヤング率を得る。

本項では、組み合わせはりの原理の概要と実験により下地金属およびコーティング膜のひずみ量が得られた後の下地金属およびコーティング膜のヤング率の解析方法について述べる。

(1) 下地金属のヤング率解析

コーティング膜が施されていない下地金属のみで作られた幅 b 、厚さ h_s の矩形断面のはりの一端を固定し、他方に荷重を加え曲げモーメント M を受ける場合、下地金属に生じる応力 σ_s は、応力とひずみの関係式から

$$\sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s \quad (A.6)$$

となる．従って，下地金属のヤング率 E_s は，

$$E_s = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} \quad (\text{A.7})$$

となる．ここで ε_s は下地金属に生じるひずみである．また，応力 σ_s は次式で示される．

$$\sigma_s = \frac{M}{Z} = \frac{6WL}{bh_s^2} \quad (\text{A.8})$$

ここで， M は曲げモーメント， Z は断面係数でありそれぞれ次式で示される．

$$M = W \times L$$

$$Z = \frac{bh_s^2}{6} \quad (\text{A.9})$$

ここで， L は，負荷位置からひずみゲージ中心までの距離である．従って，下地金属ヤング率 E_s は，

$$E_s = \frac{6WL}{\varepsilon_s bh_s^2} \quad (\text{A.10})$$

となる．

従って，下地金属の形状 b , h_s , 荷重 W , 負荷位置からひずみゲージ中心までの距離 L および，実験により測定された下地金属に生じるひずみ量 ε_s を用いて，下地金属のヤング率 E_s を得る．

(2) コーティング膜のヤング率解析

2種類以上の異なる材料を組み合わせて作られたはりを組み合わせはりという^[A.4]．付図 2.3(a), (b)に示すように，2種類の材料『コーティング膜』と『下地金属』を組み合わせて作られた幅 b , 厚さ h の短形断面のはりが曲げモーメント M を受ける場合を考える．付図 2.3(a)は，コーティング膜を施した片持ちはりの X-Y 断面の一部，付図 2.3(b)は，付図 2.3(a)中の A-B 断面における Y-Z 断面をそれぞれ示す．

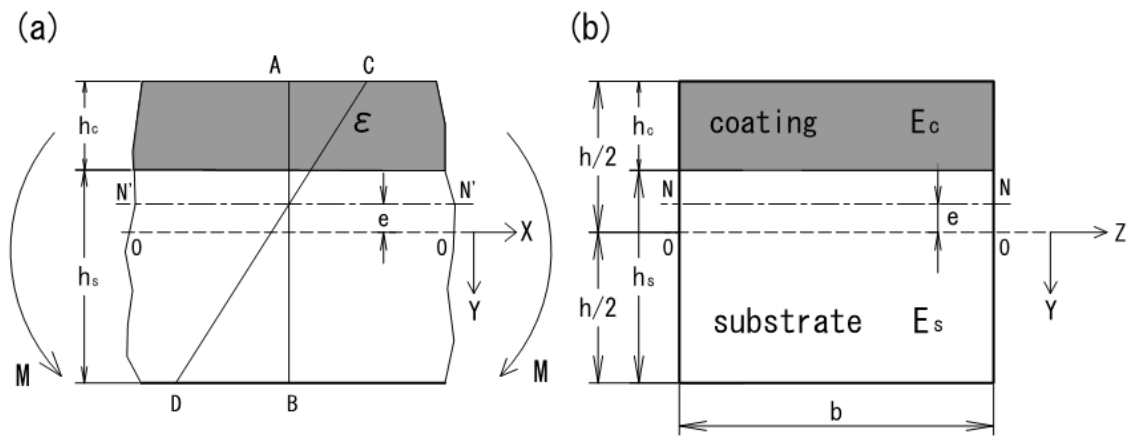
コーティング膜と下地金属の間の結合は強固で変形時，界面ではすべりはないものとする．この片持ちはりに曲げモーメント M が作用する場合，はりの厚さの中央を通る水平軸より y なる距離にある縦方向のひずみ ε は，はりの厚さの中央を通る水平軸と中性軸との距離を e とし，中性面の曲率半径を ρ とすると，

$$\varepsilon = \frac{y+e}{\rho} \quad (\text{A.11})$$

によって与えられる．ただし y は下向きを正とする．実験ではコーティング膜表面のひずみ量を測定するので， y は

$$y = -\frac{h_c + h_s}{2} \quad (\text{A.12})$$

となる．従って，コーティング膜表面のひずみ量 ε_c は



付図 2.3 コーティング膜を施した片持ちはりの断面図

$$\varepsilon_c = -\frac{h_c + h_s}{2\rho} + \frac{e}{\rho} \quad (\text{A.13})$$

となる．

また，コーティング膜および下地金属に働く応力 σ_c および σ_s は，(A.11)式より

$$\sigma_c = E_c \varepsilon = \frac{E_c (y + e)}{\rho} \quad (\text{A.14})$$

$$\sigma_s = E_s \varepsilon = \frac{E_s (y + e)}{\rho} \quad (\text{A.15})$$

となる．ここで ρ および e は未知数であるので，これらを定めるために応力による力およびモーメントの釣り合いを考える．

はりは曲げモーメントのみを受け，軸方向に作用する外力はないとすれば，断面全体に働く応力の総和は0でなければならない．すなわち，

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{-(\frac{h}{2}-h_c)} \sigma_c b dy + \int_{-(\frac{h}{2}-h_c)}^{\frac{h}{2}} \sigma_s b dy = 0 \quad (\text{A.16})$$

である．

次に全断面に働く応力による中性軸まわりのモーメントはその断面に働く曲げモーメント M に等しいものでなければならないから

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{-(\frac{h}{2}-h_c)} \sigma_c (y + e) b dy + \int_{-(\frac{h}{2}-h_c)}^{\frac{h}{2}} \sigma_s (y + e) b dy = M \quad (\text{A.17})$$

となる．ここで， $M = W \times L$ である．

(A.16)式および(A.17)式に(A.14)式および(A.15)式を代入すると

$$E_c \int_{-\frac{h}{2}}^{-(\frac{h}{2}-h_c)} (y + e) b dy + E_s \int_{-(\frac{h}{2}-h_c)}^{\frac{h}{2}} (y + e) b dy = 0 \quad (\text{A.18})$$

$$E_c \frac{b}{\rho} \int_{-\frac{h}{2}}^{-(\frac{h}{2}-h_c)} (y + e)^2 dy + E_s \frac{b}{\rho} \int_{-(\frac{h}{2}-h_c)}^{\frac{h}{2}} (y + e)^2 dy = M \quad (\text{A.19})$$

となる．(A.18)式の積分を行い， $h = h_c + h_s$ となることを考慮して整理すると

$$-E_c h_c \left(\frac{h_s}{2} - e \right) + E_s h_s \left(\frac{h_s}{2} + e \right) = 0 \quad (\text{A.20})$$

これよりはりの厚さの中心を通る水平軸と中性軸との距離を示す e は

$$e = \frac{h_c h_s (E_c - E_s)}{2(E_c h_c + E_s h_s)} \quad (\text{A.21})$$

となる．次に(A.19)式の積分の項を

$$I_c = b \int_{-\frac{h}{2}}^{-(\frac{h}{2}-h_c)} (y + e)^2 dy \quad (\text{A.22})$$

$$I_s = b \int_{-(\frac{h}{2}-h_c)}^{\frac{h}{2}} (y+e)^2 dy \quad (\text{A.23})$$

とおけば I_c および I_s は中性軸に関するコーティング膜および下地金属の断面慣性モーメントを表す．よって

$$I_c = \frac{bh_c^3}{12} + bh_c \left(e - \frac{h_s}{2}\right)^2 \quad (\text{A.24})$$

$$I_s = \frac{bh_s^3}{12} + bh_s \left(e + \frac{h_c}{2}\right)^2 \quad (\text{A.25})$$

となる．従って(A.21)式により e の値が求まれば，(A.24)式および(A.25)式より I_c および I_s の値が定まり，(A.19)式は次式のように示される．

$$\frac{1}{\rho} (E_c I_c + E_s I_s) = M \quad (\text{A.26})$$

これより，この場合の曲げの曲率 $1/\rho$ が定まり

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E_c I_c + E_s I_s} \quad (\text{A.27})$$

となる．

(A.13)式の右辺に，(A.21)式，(A.24)式，(A.25)式および(A.26)式を代入し整理すると，コーティング膜表面のひずみ量 ϵ_c はコーティング膜のヤング率 E_c の関数として表される．

従って，実験により得られたコーティング膜表面のひずみ量 ϵ_c と，試験片の形状 b , h_c , h_s および荷重 W , 負荷位置からひずみゲージ中心までの距離 L を用いてコーティング膜のヤング率 E_c を得る．

2. 5 実験結果

コーティング膜を施した試験片に用いて曲げ試験を行い，得られたひずみ量から組み合わせはりの原理を用いてコーティング膜のヤング率を得た．付図 2.4 は，下地金属である SPCC 材と WC/12%Co 膜および $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\%\text{NiCr}$ 膜のヤング率測定結果を示す．

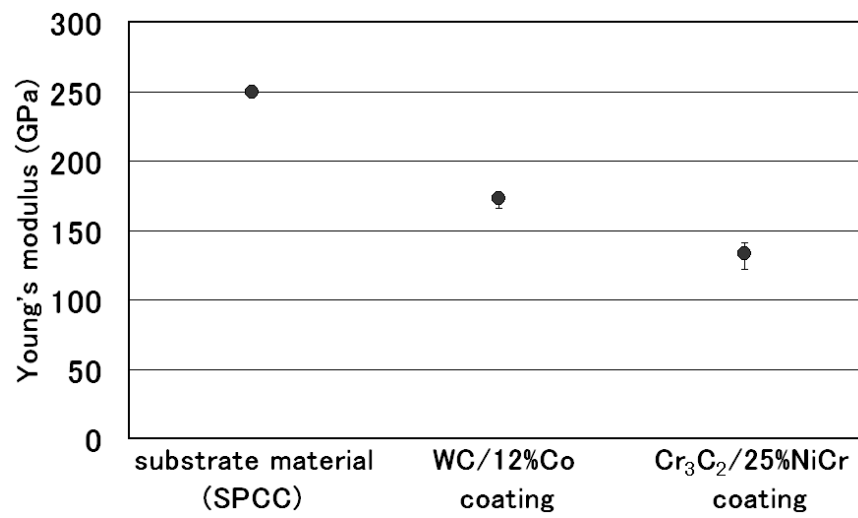
下地金属に用いた SPCC 材のヤング率は約 250GPa である．これは SPCC 材の公称ヤング率値とほぼ一致している．WC/12%Co 膜のヤング率は約 170GPa であり， $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\%\text{NiCr}$ 膜のヤング率は約 130GPa である．測定された WC/12%Co 膜のヤング率値はバルクの WC のヤング率値約 720GPa^[A.7]と比較すると小さい．HVOF 溶射によって成膜されたコーティング膜は，内部に気孔や酸化物が含まれているためにバルク材と比較すると緻密さが劣る．従って，コーティング膜のヤング率は溶射材料のバルク状態でのヤング率と比べて小さくなると考える．

本研究により得られた WC/12%Co 膜のヤング率値約 170GPa は、元田らが WC/12%Co 膜のヤング率を押込みにより測定し^[A.5]得られたヤング率の平均値約 140GPa と比較的良く一致している。本研究で使用した WC/12%Co 膜は HVOF 溶射法を用いて成膜したのに対して、元田ら^[A.5]が使用した WC/12%Co 膜はプラズマ溶射法により成膜したものであり、その結果、溶射法の違いにより溶射膜の緻密さが異なるために、双方に差が生じたものと考ええる。

以上のことからコーティング膜を施した試験片を用いて曲げ試験を行い、得られたひずみ量から組み合わせはりの原理を用いてコーティング膜のヤング率を得る本手法は、コーティング膜のヤング率を得る一つ的手段として有効であり、本手法は、実際に使用されるコーティング膜のヤング率評価に適用可能であると考ええる。

2. 6 小結

- (1) コーティング膜を施した試験片に用いて曲げ試験を行い、得られたひずみ量から組み合わせはりの原理を用いてコーティング膜のヤング率を得る測定装置を製作した。
- (2) WC/12%Co 膜のヤング率は $\text{Cr}_3\text{C}_2/25\%\text{NiCr}$ 膜のヤング率より大きいことが示された。
- (3) 本研究により得られた下地金属のヤング率値は公称値とほぼ一致し、コーティング膜のヤング率値は、他の測定方法により得られたヤング率値と比較的よく一致した。これにより、本手法は、コーティング膜のヤング率を得る一つ的手段として有効であり、実際に使用されるコーティング膜のヤング率評価に適用可能であることが示された。



付図 2.4 SPCC 材と WC/12%Co 膜および Cr₃C₂/25%NiCr 膜のヤング率測定結果

参考文献

- [A. 1] Y. Tobiyama, B. Berby, J. B. Pethica : Influence of Heat Treatment on the Mechanical Problems of Electroless Nickel Films, Defect Structure, Morphology and Properties of Deposits, The Mineral, Metals & Materials, (1993) , 335.
- [A. 2] 柳沢雅広：ナノインデントーによる薄膜の硬度，弾性の測定法，トライボロジスト，40，3 (1995)，199.
- [A. 3] 田畑修：薄膜ヤング率測定装置，豊田中央研究所 R&D レビュー，28，2，(1993)，54.
- [A. 4] 例えば，中原一郎著：材料力学（上巻），養賢堂，(1965), 161.
- [A. 5] 元田智弘，志摩政幸，佐々木信也：球の押込みによる耐摩耗被膜のヤング率測定システムの構築，トライボロジスト，48，6 (2003)，503.
- [A. 6] 上野和夫：入門講座 サーメット溶射(1) 皮膜の特性と応用，日本溶射協会誌，42，2，(2005)，80.
- [A. 7] 五日市剛：セラミック・サーメット溶射材料の選び方・使い方，溶射技術，22，2，(2002)，57.